

## 摘要

微弧氧化是在阳极氧化工艺的基础上发展起来一种表面改性新技术，它利用微区电弧放电在金属表面生成陶瓷状氧化膜。本文根据微弧氧化处理过程中的工艺要求和现象，以自行研制的多功能脉冲微弧氧化电源为试验平台，通过对膜层生长过程的探讨了镁合金微弧氧化膜层形成机理，提出微区电弧放电模型；根据对系统负载特性的分析提出微弧氧化对电源的要求，并据此设计了一种新型的带放电回路的微弧氧化脉冲电源。

研究表明，微弧氧化过程主要分为阳极氧化、微弧放电、大弧放电三个阶段。微弧氧化膜层是由一系列离散的微区电弧放电产生的金属氧化物累积形成，瞬间完成的微小区域内的电弧放电，使生成的氧化物经历骤热骤冷过程，从而可获得非平衡组织结构的金属氧化物膜层。微区电弧放电主要分为电解、放电、氧化、冷却等四个过程。其产生电弧放电的必要条件是：试样表面存在氧气气泡并承受强电场。微弧氧化成膜主要包括电解液、初始膜层、导电通道、高压电场及水的电解产生氧气等五个条件。

通过对微弧氧化系统电压、电流信号的采集和分析发现负载阻抗随时间的增加是逐渐增加的，并用 MATLAB 拟合出在频率 700、占空比 20% 时的系统阻抗与处理时间的关系式。研究发现，微弧氧化过程中负载特性可以用 RC 电路来简单等效，并求出了膜层厚度与工艺参数之间的对应公式。分别采用直流电压、单极性脉冲、双极性脉冲、带放电回路的电源形式分别进行微弧氧化实验，发现电源形式对镁合金微弧氧化过程起着关键性的作用。带放电回路的脉冲形式能极大抑制微弧氧化的大弧倾向，因此具有较好的处理效果。研究了恒定电压、电流下微弧氧化陶瓷膜的生长速率，发现在恒流模式下膜层生长效率较高。探求脉冲作用时间与冷却时间之间的关系，发现在频率 700Hz 时两者的最佳配比是 1: 4。

根据负载特性研究表明，阻性和容性是微弧氧化负载的主要特点，放电回路的引入能解决其电容性在微弧氧化过程中造成电弧持续燃烧的问题。据此设计了一种新型的带放电回路的微弧氧化脉冲电源。电源使用 IGBT 串联实现脉冲放电间隙放电回路、IGBT 并联实现电源的大功率输出；控制系统以 80C196KB 单片机为核心，利用其高速输入口进行同步信号采集和高速输出口产生 IGBT 驱动信号；用数字 PI 调节方式获得恒流、恒压输出特性。研制的样机在运行中表现出良好的稳定性和可靠性。

**关键字：**微弧氧化，负载特性，脉冲电源，放电回路

# Abstract

Micro-Arc Oxidation is a new surface treatment technique, developed from anodic oxidation, which used micro-arc discharge in the metal oxide ceramic membrane. In this paper, we discuss mechanism of micro-discharge and model of micro-arc oxidation, which based on the test platform which build with self-developed high-power, multi-output of the pulse; the techniques requirement and phenomenon and the grown progress of ceramic membrane. Design a new typical power according as the requirement which bring forward based on system load characteristic.

Study showed Micro-arc oxidation process can be divided into three stages, named: anodic oxidation, the spark discharge and the micro-arc oxidation stages. Ceramic layer was mainly components by metal oxide which formed by a series of micro-discharge. Non-balance metal oxide film can be made by discharge in small extent in the progress of fast hot and then fast cool. Micro-arc discharge can be divided into four stages, named: electrolyte, discharge, oxidation and cooling. The necessary condition of arc-discharge happening is exist of oxygen on the magnesium alloy surface and the oxygen endured definite electric field. Forming Micro-arc Oxidation film must have five conditions, it contains: electrolyte, initialization film, high-handed electric field and the oxygen produced by electrolyze water.

According to collect and analyze signals of voltage and current. Found that: the increase of load impedance is gradually along with time. And then educe a curve of system impedance-deal time in the condition of frequency 700 and pulse duty 20% by MATLAB. Study showed that: The load characteristic of Micro-arc Oxidation can be replaced by RC circuit. And then educe a formula which between film thickness and techniques parameter. We can find that the typical of power have a key function in the progress of magnesium alloy Micro-arc Oxidation when we tried different power contain: direct current , AC pulse power , DC pulse power and discharge current pulse power. The discharge current pulse power has a good effect because it can abolish big arc effectually. Find that the film grown fast in the invariableness current modal when we study the film speed between invariableness voltage and invariableness current. The best match time between pulse action and cooling is 1:4 in the condition of pulse frequency 700Hz.

The study of load characteristic showed that: the mostly characteristic are resistance and capacitance. The problem of arc persistence burning can be settled by

importing the discharge current. According this we design a new typical power with discharge current. This power come true pulse discharge alternation with IGBT in series; come true output great power with IGBT parallel connection. The control system core is 80C196KB which high speed input gob can be used to collect in-phase signal and output high speed IGBT drive signal; invariableness voltage and invariableness current output characteristic can be obtained by figure PI adjusted. The sample power has a good characteristic of credibility in the circulating.

**Key Words:** Micro-arc Oxidation; Load Characteristic; Pulse Power; Discharge Loop

# 兰州理工大学学位论文原创性声明和使用授权说明

## 原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：



日期：2009年5月27日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权兰州理工大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。同时授权中国科学技术信息研究所将本学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并通过网络向社会公众提供信息服务。

作者签名：



日期：2009年5月27日

导师签名：



日期：2009年5月27日

# 第 1 章 绪论

## 1.1 微弧氧化表面处理技术

### 1.1.1 微弧氧化技术产生与发展

二十世纪三十年代初, Gunterschulze 和 Betz 合作研究中发现, 浸在电解液中的金属在高压电场作用下, 表面会出现火花放电现象, 放电火花对金属表面有破坏作用<sup>[1]</sup>。在当时的技术条件下, 他们认为“为了得到高质量的涂层, 就不应该用高于火花时的电压进行处理”, 这为阳极氧化奠定了初步的理论基础。直到 1969 年, 前苏联科学家 G.A.Markov 发现, 当在铝及其合金的样品上施加的电压高于火花区电压时, 却获得了高质量的氧化膜层, 它具有很好的耐磨损、耐腐蚀性能<sup>[2]</sup>。俄科学工作者认为这一方法的机理十分复杂, 在材料表面陶瓷氧化层的形成过程中, 除了阳极氧化、电化学沉积反应存在外, 其他化学(如高温化学、等离子体化学)、物理(如结晶、熔融、高温相变、电泳等)现象也都有重要的作用; 而微弧(微等离子体)现象和陶瓷氧化层的形成是其重要的特征, 所以采用了微弧氧化(Micro-arc Oxidation)名称<sup>[3]</sup>。

二十世纪九十年代后期, 在国际上, 先后有人采用这一技术制备出了具有不同性能的微弧氧化陶瓷膜。如 Malyshev 等<sup>[4]</sup>报道, 铝基体经过微弧氧化处理后, 依据基体的厚度和氧化膜的相对深度, 可以使它的有效杨氏模量提高 100%~200%; Yerokhin 等<sup>[5]</sup>在纯铝基体上制备出了硬度和厚度分别为 18~23GPa 和 165~190 $\mu\text{m}$  的耐一磨损膜; Dearnley 等<sup>[6]</sup>在铝合金基体上制备出厚度达 150 $\mu\text{m}$  的耐磨损膜。Gnedenkov 等<sup>[7]</sup>在铝合金基体上制备了厚度在 15~32 $\mu\text{m}$ , 硬度在 1800~7000MPa 之间, 耐温能力可高达 870 $^{\circ}\text{C}$  的耐热冲击膜; Chigrinova 等<sup>[8]</sup>在柴油机的铝合金活塞上制备出厚度达 200 $\mu\text{m}$  的耐热保护膜。Apelfeld<sup>[9]</sup>等在铝和镁合金上制备了具有极强耐腐蚀能力的陶瓷膜; 另外, Nie, Twite 和 Shimizu 等<sup>[10]</sup>也对各自所制备的耐腐蚀保护膜的性能先后进行过报道。Aicai, Yongqing 和 Shaffei 等<sup>[11]</sup>在铝合金上制备了装饰用的彩色陶瓷膜。此外, Gordienko 和 Rudnev 等<sup>[12]</sup>在钛合金上制备了防细菌膜; Vlyssides 等<sup>[13]</sup>在钛及其合金上制备出具有光催化作用的功能陶瓷膜。到了 2000 年以后, Nie 等<sup>[14]</sup>先后在纯钛及其合金上制备了与生物相兼容的生物陶瓷膜。最近, Faramarz 等<sup>[15]</sup>利用微弧氧化技术, 在钛合金上制备了对气体极其敏感的功能陶瓷膜。

从 20 世纪六、七十年代微弧氧化技术产生至今, 无论是微弧氧化工艺所使用

的电源设备，还是电参数、电解液参数都经历了许多变化。

从电源特征看，最早采用的是直流或单向脉冲电源，随后采用了交流电源，后来发展为不对称交流电源<sup>[16]</sup>。现在脉冲交流电源应用的较多，因为脉冲电压特有的针尖作用，使得微弧氧化膜的表面微孔相互重叠，膜层质量好。

在微弧氧化过程中，通过调整正、负脉冲幅度和宽度的优化选择，使微弧氧化膜层性能达到最佳，并能有效地节省能源。最近，对于双极性脉冲电源的研究陆续见报道。从基体合金上看，研究主要集中在铝、钛、镁合金上。所研究的铝合金主要有 Al-Cu-Mg、Al-Si-Mg、Al-Zn-Mg、Al-Si、Al-Mg、Al-Cu-Zn-Mg 等。在钛合金基体上进行微弧氧化处理主要是为了制备具有催化、生物活性等功能的膜层，基体合金成分主要是 Ti-6Al-4V，也有报道用纯钛作为基体。镁合金的微弧氧化处理主要是解决耐蚀性问题。所研究的镁合金主要有：纯镁、AZ91、AZ31、AM60、SiCw/AZ91。近来有文献报道了钢铁表面通过电弧喷涂或热浸镀铝层后进行微弧氧化处理，从而扩大了微弧氧化的应用范围<sup>[17-18]</sup>。

从电解液选择上看，可以是酸性的，也可以是碱性的。但目前多用弱碱性电解液，并通过添加无机及有机添加剂改变微弧氧化膜层的成分，进而实现膜层性能的可设计性。有文献指出，实际选用电解液时不能简单的根据电解液的酸碱度、导电性大小、粘度、热容量等理化因素来确定，还要考虑被处理的基体合金材料，选用的电解液应对合金及其氧化膜具有一定的溶解和钝化作用<sup>[19]</sup>。工艺控制方面，有恒电压微弧氧化法和恒电流微弧氧化法两类，一般采用恒电流法，因为此法省时且易于控制。

近年来，国际上主要有俄罗斯、美国和德国等在努力发展微弧氧化技术，研究这一技术所制备的陶瓷膜各方面的性能及其应用<sup>[20]</sup>。我国从 90 年代开始关注此技术，仍处于起步阶段，在引进吸收俄罗斯技术的基础上，现在也开始由耐磨、装饰性涂层的形式走向实用阶段。国内研究此项技术的单位主要有，北京师范大学低能核物理研究所、北京有色金属研究总院、北京航空材料研究院、湖南大学等<sup>[1]</sup>。其中，以北京师范大学低能核物理研究所在这方面的工作较为系统，他们主要对铝合金微弧氧化的制备过程、工艺条件、膜层的形貌结构进行了研究。从国内各研究单位发表的文章来看，对微弧氧化的研究大多集中在铸铝及硬铝合金上，对镁合金的微弧氧化则研究较少。研究内容大多是关于膜层性能（厚度、耐磨性、硬度等）及成膜因素分析，也有部分关于复合膜层（如减磨膜层）制备、微弧氧化理论介绍及探索性文章<sup>[21]</sup>。

### 1.1.2 微弧氧化的基本原理

微弧氧化技术(MAO-Microarc Oxidation)又称微等离子体氧化(PMAO)或阳极火花沉积(ASD)，是最近十几年在阳极氧化基础上发展起来的一种表面处理新技术

[22]。它采用较高的能量密度，将阳极氧化工作区从法拉第区引入到高压放电区，通过电化学、热化学及等离子体化学等的共同作用，在 Al、Mg、Ti、Nd 等贵金属表面原位形成陶瓷质氧化膜。微弧氧化是阳极氧化技术的发展，其实质仍是较高电压下的阳极氧化，但其成膜过程涉及电化学、热化学及等离子体化学等的共同作用，成膜机理更趋复杂。微弧氧化在阳极区产生微弧放电，火花存在时间为 1~2s，火花放电使阳极金属表面局部温度升高，微区温度一般高于 1000℃，从而使阳极氧化物熔覆在金属表面，形成陶瓷质的阳极氧化膜，大大提高了阳极氧化膜的硬度、致密性和耐蚀性。

将 Al、Mg、Ti 等金属样品放入电解质溶液中，通电后金属表面立即生成很薄的一层金属氧化物绝缘膜。形成完整的绝缘膜是进行微弧氧化处理的必要条件。当在样品上施加的电压超过某一临界值时，这层绝缘膜上某些薄弱环节被击穿，发生微弧放电现象，浸在溶液里的样品表面上可以看到无数个游动的弧点或火花。因为击穿总是在氧化膜相对薄弱部位发生，当氧化物绝缘膜被击穿后，在该部位又生成了新的氧化膜，击穿点转移到其它相对薄弱区域，因此最终形成的氧化膜是均匀的。

每个弧点存在的时间短，但等离子体放电区瞬间温度很高；Van 认为瞬间温度超过 2000℃，Krysmann 计算出其温度可达 8000K<sup>[23]</sup>。在此区域内金属及其氧化物发生熔化，使氧化物产生结构变化。从微弧氧化膜表面形貌观察，可以看见许多残留的放电气孔，孔周围有熔化的痕迹，证实放电区瞬间温度确实很高。微弧氧化不同于常规的阳极氧化技术，它在工作中使用较高电压，在微弧氧化过程中，化学氧化、电化学氧化、等离子体氧化同时存在，因此陶瓷氧化膜的形成过程非常复杂，至今还没有一个合理的模型全面描述陶瓷膜的形[24]。外加电压大于约 100V 时，电压从普通阳极氧化法拉第区进入高压放电区，氧化膜开始被击穿；当电压大于 700-800V 时，进入弧放电区，样品表面出现较大的弧点，并伴随着尖锐的爆鸣声，它们会在膜表面形成一些小坑，破坏膜的性能。

国外研究表明，微弧氧化分为以下几个基本过程：空气间电荷在氧化物基体中形成；在氧化物孔中产生气体放电；膜层材料的局部熔化；热扩散；胶体微粒的沉积；带负电的胶体微粒迁移进入放电通道；等离子体化学和热化学反应。有关微弧氧化机理的研究报道很少，这主要是由于其研究难度比常规氧化过程要大得多。

### 1.1.2 微弧氧化的工艺特点

与阳极氧化、电镀传统表面处理技术相比，微弧氧化技术具有工艺简单、效率高、无污染，处理工件能力强等优点<sup>[25]</sup>。因此，引起世界各国研究人员的关注。微弧氧化装置简单易实现，电解液大多为碱性，对环境污染小；溶液温度可变化

范围较宽；微弧氧化的工艺流程较简单且处理效率高，对材料的适用性宽。表 1-2 是微弧氧化技术与阳极氧化技术的工艺特点比较<sup>[26]</sup>。

表 1.1 微弧氧化和阳极氧化工艺特点比较

工艺特点	微弧氧化	阳极氧化
电压、电流	高压、电流密度大	低压、电流密度小
工艺流程	去污-微弧氧化	碱洗—酸洗—机械性清理-阳极氧化—封孔
溶液性质	碱性	酸性、碱性
工作温度	常温	较低温度
处理效率	高	低
对材料适应范围	宽(适用于 Al, Mg, Ti, Zr 等多种金属及合金)	窄(主要用于 Al, Mg 合金)
对工件形状要求	能处理各种形状复杂的工件	只能处理简单形状的工件
成膜质量	较致密有微孔、较厚	较疏松且薄

微弧氧化工艺的特点：

#### 1. 具有高硬度、与基体良好的结合性能

经处理后的表面致密具有高硬度并且与基体结合很好，保持一定力学性能。例如铝工件经过微弧氧化后，硬度可达 1000HV，最高显微硬度可达 3000HV，与基体结合力强。微弧氧化技术可极大改善铝、镁合金表面的强度同时又没有降低其拉伸性能，为铝、镁的广泛应用创造了良好的条件。

#### 2. 具有良好的耐腐蚀、耐热冲击性能

微弧氧化膜能耐酸、碱、海水、和盐雾的腐蚀。在经过 1000h 中性盐雾实验后，氧化膜未发现腐蚀坑，也未见任何腐蚀痕迹，表明其优异的耐蚀性。可用于化学设备、建筑、泵部件等领域。在经受 35 次，300℃ 到 20℃ 水淬实验和 1300℃ 热冲击后，没有龟裂和膜层脱落现象。说明它有很好的耐热、及耐热冲击性。

#### 3. 具有良好的耐磨、绝缘性能

由于微弧氧化后可使材料表面形成含有微孔隙的陶瓷表层，在使用传统润滑剂时摩擦系数可降至 0.06—0.12。如果在微孔隙中填充以二硫化钼或聚四氟乙烯等固体润滑剂，则更有独特的减摩擦、及磨损效果<sup>[27]</sup>。实验证明随着摩擦时间的延长，磨损质量损失反而显著减少。这是由于靠近基体的氧化膜更加致密，相应的硬度和密度更高。除此之外，微弧氧化膜还具有良好的绝缘性，绝缘电阻达 100MΩ。

#### 4. 具有良好的耐热、绝热、及隔热性能

由于表面覆盖耐高温的陶瓷层，所以铝合金在短时间内可耐受 800~900℃ 甚

至 2000℃ 的高温，可提高铝、镁、和钛等合金部件的工作温度。

### 5. 具有良好的拉伸性能

LY12 铝合金表面生长一层陶瓷氧化膜经过抛光后，拉伸性能有所改善。已拉伸试样的表面均匀地残留大量氧化膜碎片，显示氧化膜与基体结合状况良好。

6. 具有良好的光吸收与光反射性微弧氧化陶瓷膜可以做成不同性能、不同颜色的陶瓷层，例如黑色或白色，可吸收或反射的光能大于 80%，可用于太阳能吸热器或电子元件的散热片。

## 1.1.3 微弧氧化技术应用前景

通过微弧氧化工艺方法获得的膜层与基体结合紧密，为原位生长膜层，厚度最多可达几百  $\mu\text{m}$ ，显微硬度可超过 3000 HV，绝缘电阻大于 100M $\Omega$ 。极大改善了 Al、Mg、Ti 等有色金属及其合金的耐蚀性、耐磨性、抗冲击性和绝缘性，可以在很大程度上扩大上述金属的应用领域。所以微弧氧化技术在航空、民用、涂层、装饰等领域（如表 1.2 所示）都有广阔的应用前景<sup>[28]</sup>。

表 1.2 微弧氧化陶瓷膜的应用领域

微弧氧化膜层的适用范围	
腐蚀防护膜层	化学化工设备、建筑材料、石油工业设备、机械设备
耐磨膜层	航空、航天、船舶、纺织等所用的传动部件
电绝缘膜层	电子仪表、化工能源等工业的电器元件
光学膜层	精密仪器
功能膜层	化工材料、医疗设备
装饰膜层	建筑材料、仪器仪表

例如，在航空和汽车发动机制造业中的汽缸、活塞类零件上镀微弧氧化涂层可以抗高温腐蚀。同时，这种微弧氧化涂层还可起到热障作用。相同应用的还有涡轮机叶片和发动机喷嘴。在石油化工和天然气工业中，铝合金零件表层的微弧氧化涂层和钢表面的复合涂层（在钢件上先附铝，然后进行微弧氧化加工处理），具有良好耐蚀和耐磨性能。如用于泵的柱塞、端部密封(可取代硬质合金和硅化处理的石墨封环)等。在石油工业管道工程中，用微弧氧化处理的闸阀挡板，具有良好的抗硫化氢介质的腐蚀，其使用寿命可增加几倍<sup>[29]</sup>。在城市供水设施中由于微弧氧化涂层的耐磨耐蚀性能，可提高水泵零件(泵套、叶轮、盖)和闸伐件的使用寿命。在机器制造业中，微弧氧化涂层可应用于真空无油泵和涡轮泵的高速旋转零件。在食品和饲料加工机械领域中，可替代合金钢，制造出在恶劣的磨擦条件下工作的超高效研磨粉碎零部件<sup>[30]</sup>。

## 1.2 微弧氧化负载特性研究现状

长安大学的陈宏、郝建民、冯忠绪等为了研究微弧氧化的基本过程和机理，采用自行设计的气体介质电极击穿放电试验装置，测量了微弧氧化过程中阴极和阳极之间的距离与最低击穿电压的关系曲线，并建立了微弧氧化阳极气泡击穿理论模型和阳极等效电路。结果表明：最低击穿电压  $V_k$  值大小随阴、阳极之间距离增大而近似线性增加，微弧氧化膜层是在气泡位于陶瓷层的孔隙处时而生长；阳极气泡击穿理论模型能够合理地解释微弧氧化的基本过程和机理，并为改善微弧氧化工艺和提高膜层性能提供了理论基础<sup>[31]</sup>。

哈尔滨工业大学杨世彦、邓宇航等人进行负载特性仿真所使用的仿真软件采用 OrCAD9.2，该软件是 OrCAD 公司购并 Pspice 推出的个人电脑电路仿真软件。Pspice 模拟器可以模拟被分析电路的直流特性、交流特性及瞬态特性，可以进行温度特性、噪声特性及灵敏度等特性的分析<sup>[32]</sup>。电路工作频段可由低频段到微波段。

根据电流、电压波形将微弧氧化过程分为两个阶段。第一个阶段为无定型氧化膜生长初期，电压变化和电流变化基本相同，故负载呈现电阻特性。但当负载中电流为零时，负载上的电压并不为零，故负载还应具有蓄电池特性。第一阶段负载电路模型如图 1.1 所示。第二阶段为无定型氧化膜增厚和陶瓷氧化膜形成期。建立的负载电路模型如图 1.2 所示，其中  $R_1$ 、 $R_2$  均为可变电阻。

由两个负载电路模型可以看出：当工件表面生成无定型氧化膜后，工件、槽液和电源极板三者所组成的负载将会表现出一定的电容性，这种情况在工业化大规模生产中表现得尤为突出。

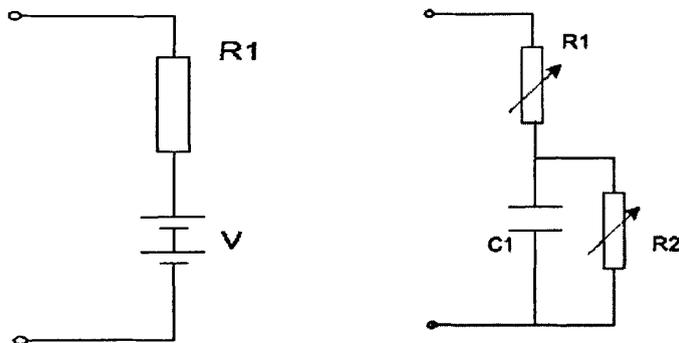


图 1.1 第一阶段负载电路模型      图 1.2 第二阶段负载电路模型

在工业化大批量微弧氧化生产或者处理表面积很大的工件时，由工件、槽液和电源极板三者所组成的负载中，电场是一个分布式电场，电阻和电容特性也是分布式地表现在其中。如果采用双极性脉冲电源作为微弧氧化的电源，电源的正脉冲会对电容部分充电，假设正脉冲电压为  $U_0$ ，电容两极板之间的电压为  $U_1$ ，则

实际作用于微弧氧化过程的电压为  $U_0 \sim U_1$ ；而当正脉冲结束时，电容开始放电，负载中的电压和电流方向发生改变，相当于一个电压为  $U_1$  的负脉冲加到了负载的两端。由此可见，在实际生产过程中，不引入负脉冲时，微弧氧化过程的负载中仍然会有负电压的作用。所以，研究负载的特性，对于指导微弧氧化生产电源工艺和参数具有相当重要的意义。

## 1.3 国内外微弧氧化电源研究现状

### 1.3.1 微弧氧化电源发展概况

上世纪 70 年代，美国、德国和前苏联都开始研微弧氧化技术，70 年代后期逐步引起国外学术界研究兴趣，80 年代成为国内外学者的研究热。目前世界上主要有俄罗斯、美国、德国等国从事微弧氧化技术的研究工作。其中以俄罗斯的投入最大，在基础研究和开发应用上也一直处于世界领先地位。

我国从 20 世纪 90 年代开始关注此项技术，该领域的研究机构也不少，如：北京师范大学、哈尔滨工业大学、西安理工大学、哈尔滨环亚微弧技术有限公司、吉林大学、北京航空材料研究院、华南理工大学、燕山大学、湖南大学、北京矿冶研究总院等<sup>[33]</sup>，并且已开始耐磨、装饰性涂层方面走向实用阶段。其中哈尔滨环亚微弧技术有限公司已经由试验阶段转向小批量生产，并已建成一条半自动生产线；西安理工大学所开发的微弧氧化设备已经应用于一汽集团等企业的铝、镁合金制品的后处理中。但是，目前微弧氧化技术在国内外均未进入大规模的工业应用阶段<sup>[34]</sup>。

微弧氧化电源已成为制约该技术应用的关键因素，直接影响微弧氧化膜层的性能<sup>[35]</sup>。微弧氧化电源有直流，单向脉冲，交流，不对称交流，双向不对称脉冲电源等多种模式。最早采用的是直流或单向脉冲电源，随后采用了交流电源，后来发展为不对称交流、双向不对称脉冲电源。在世界主要研究单位中，美国伊利诺大学、北达卡他州应用技术公司和俄罗斯科学院远东化学研究所等单位仍然采用直流电源<sup>[36]</sup>；德国卡尔马克思城工业大学采用的是单向脉冲模式；而俄罗斯科学院无机化学研究院、钢铁学院、油气研究所和我国的北京师范大学等单位采用交流模式。研究表明，使用不对称的交流或向不对称脉冲作用在有色金属及合金表面所生长的陶瓷膜比采用直流脉冲所得到的陶瓷膜在性能要高得多，因此采用不对称的交流或双向不对称脉工作模式的电源是微弧氧化技术的重要发展方向。

现在，双向不对称脉冲电源应用的较多，因为脉冲电压特有的“针尖”作用，使得微弧氧化膜的表微孔相互重叠，膜层质量好。微弧氧化过程中，通正、负脉冲幅度和宽度的优化调整，使微弧氧化层能达到最佳，并能有效节约能源。目前

国内研制这类电源一般采用两极工作方式，由于正负电源输出电压不同，因此它包括正、负 2 个电源，其输需要不同的变压器经整流滤波后再提供给后级电进行斩波得到正、负输出电源。如华南理工大学接实验室采用两级逆变方式，研制了新一代大功率弧氧化电源设备。

### 1.3.2 国内微弧氧化电源研究现状

双向不对称脉冲电源是目前国内运用最多的电源形式，比起其它方式它能获得较好的膜层质量。而且能通过对正、负脉冲幅度和宽度的优化调整，使微弧氧化层性能达到最佳，并能有效节约能源<sup>[37]</sup>。目前国内的主要电源形式有三种：1) 阴阳极分别独立调压式电源（包括：晶闸管整流型电源、全桥二极管整流型电源、逆变调压型电源）；2) 两级斩波式电源；3) 两级逆变式电源

三相半控桥式晶闸管整流型电源主电路拓扑结构如图 1.3 所示，主要由正负两极变压，晶闸管整流，电容电感滤波，IGBT 斩波等电路组成<sup>[38]</sup>。三相工频变压器的初级为 1 个绕组，次级为 2 个绕组工作，分别经晶闸管整流，电感、电容滤波后，产生后级斩波所需的正负两路直流，斩波电路采用 2 个 IGBT 模块串联，分别用于产生微弧氧化所需的正负向脉冲。Q1 和 Q3 导通时，Q2 和 Q4 截止；Q2 和 Q4 导通时，Q1 和 Q3 截止，这样经过负载的电压是正负两路交替变换的脉冲电压，而极性转换加工电路的电压调节是通过单片机控制可控硅的导通角来实现的<sup>[39]</sup>。

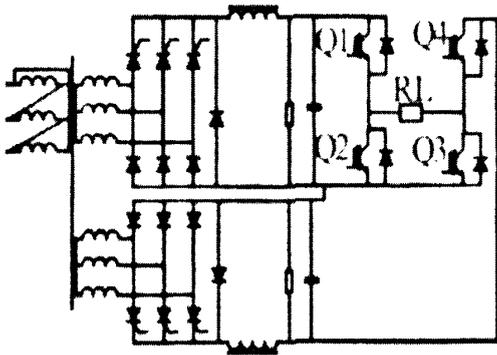


图 1.3 晶闸管整流型电源主拓扑结构图

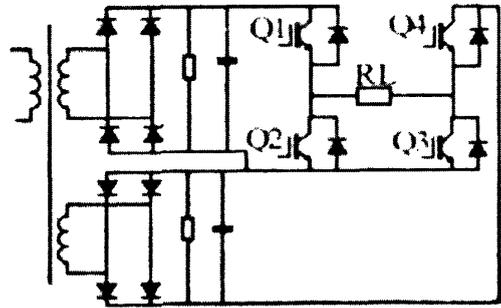


图 1.4 全桥二极管整流型电源主拓扑结构图

图 1.4 是全桥二极管整流型电源主拓扑结构图，主要也是包括正、负极电压调节电路，整流滤波电路和斩波电路等<sup>[40]</sup>。单向工频电经正负 2 个变压器调压，整流滤波后，提供后级斩波电路所需直流。该电源能提供正向，反向和双向不对称脉冲 3 种波形。

图 1.5 为逆变调压型电源系统框图，其主电路由输入端整流滤波电路、逆变调压电路（如图 1.6）、输出端整流滤波电路、极性转换加工电路等组成。三相电经整流滤波后为逆变调压电路供电，电压经逆变调压电路后再次整流滤波，转化成

直流给桥式极性转换加工电路供电，极性转换加工电路通过 IGBT 斩波变换实现对工件进行正、负极性加工<sup>[41]</sup>。

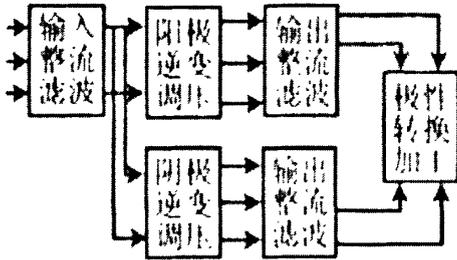


图 1.4 逆变调压型电源系统框图

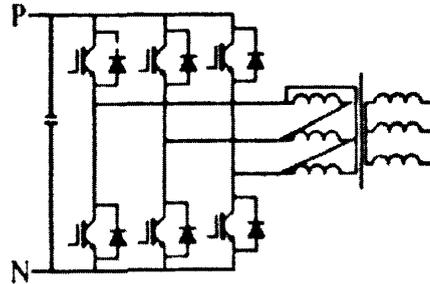


图 1.5 逆变调压电路图

两级斩波式电源的主电路在结构上分为输入整流滤波电路、斩波电路、输出整流滤波电路以及斩波逆变电路等<sup>[42]</sup>，如图 1.6 所示。其中，Q1 为斩波 IGBT，通过 Q1 通、断调节斩波电路输出的占空比，从而调节电压，Q1 的输出通过滤波电感和电容将其变为直流，作为由 Q2、Q3、Q4、Q5 构成的逆变电路的输入，将直流变成交流输出。图中通过 D1 形成反馈，以保证电源电流的相对稳定。

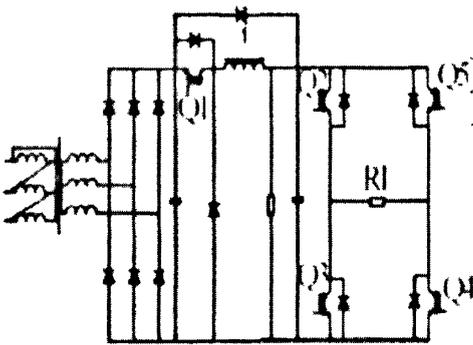


图 1.6 两级斩波式电源主拓扑结构图

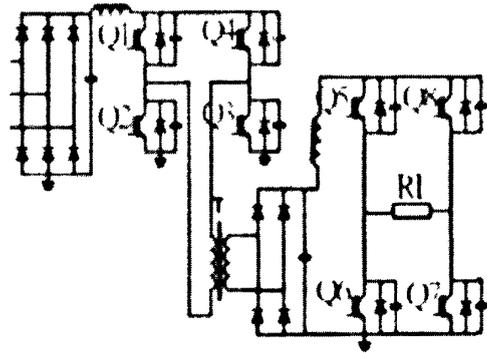


图 1.7 两级逆变式电源主拓扑结构图

两级逆变式微弧氧化电源的主电路如图 1.7 所示，由二极管三相整流电路、滤波电路、前级桥式 IGBT 逆变电路、中频变压器、二极管单相整流输出电路、IGBT 斩波变换器等部分组成<sup>[43]</sup>。电源的前级为：三相交流电经三相整流、电感、电容滤波后，获得直流电，经过 IGBT 逆变电路、高频变压器、单相整流输出电路以后可以获得连续可调的大功率直流电源，供给后级斩波电路，以实现双向不对称脉冲。

### 1.3.3 现存电源优劣性分析

从文献上来看，目前国内外从事微弧氧化的研究人员所采用的微弧氧化电源主要存在以下问题：

1. 对镁合金工件的初始表面要求高。

2. 大部分电源初级采用工频整流变压器，体积大、笨重、效率低、耗材；而即便采用逆变调压，也是分阴阳两级，这就使得电源成本高，损耗大。

3. 有些电源为开环系统，部分带电流、电压反馈控制，电源稳定性不够。

4. 正负脉冲需采用不同的变压器来得到不同的输出，控制电路复杂。

5. 后级斩波电路中开关器件处于硬开关工作状态，开关损耗大。

目前使用较广泛的双极性脉冲电源可以部分弥补其他形式电源存在的不足，其工作频率达到 20kHz 以上，可将电源的控制精度达到微秒级，大大提高系统的响应速度，显著提升电源的调节分辨率和可控性<sup>[44]</sup>；甩掉了传统的工频变压器；具有多输出特性，提高设备的工艺适应性；通过多参数反馈控制保证过程的工艺稳定性；采用智能监控，保证其工艺过程的一致性，简化了控制电路，实现了电源的高效化和智能化<sup>[45]</sup>。从而可以为铝、镁、钛等有色金属及其合金的表面处理工艺提供一种新型低成本、高可靠性、高效率的微弧氧化装备。

## 1.4 课题研究目的和意义

由于镁合金具有比重轻、比强度高、优异的电磁屏蔽和能量衰减特性及成型、可再生利用等一系列独特的优点，使其在汽车、电子、家电、通信、仪表以及航天、航空等领域的应用日益增多，然而镁合金的电极电位极低，当在潮湿的气氛中或者其他高电位金属接触时易产生腐蚀，因此镁合金的使用时必须采用可靠表面防护措施。研究文献上来看，微弧氧化技术是目前最有前途的镁合金表面处理工艺，然而，国内目前有关镁合金微弧氧化技术的研究主要集中在陶瓷层的组织结构及性能分析等方面，而对微弧氧化过程中陶瓷层的形成和生长机理的探讨较少，然而镁合金陶瓷层的生长机理和微弧氧化反应时候负载特性的研究对研制大功率微弧氧化电源具有非常关键的意义<sup>[46]</sup>。究竟什么样的电源静、动态特性、什么样的输出波形结构才最适合微弧氧化技术，最节省电能，且效率最高，目前国内外科学家均没提出一个明确的说法。而采用什么样的电源，主要取决于对负载特性的研究。只有针对负载特性设计的电源，才能达到节能、环保、高效的目的。但至今国内外对于微弧氧化负载特性的研究仍处于起步阶段，该方面的文献还很少。北京师范大学核物理研究所和解放军工程学院材料工程系目前在国内的微弧氧化研究方面处于领先的地位，发表了许多文章，但也没有进行负载特性研究和微弧氧化对电源要求等方面的研究<sup>[47]</sup>。

由于电源设备条件限制，处理频率与陶瓷膜性能之间的关系以及脉冲宽度对陶瓷膜的性能的影响如何，直到目前尚且没有得到确切论述。并且现在各研究单位进行镁合金微弧氧化表面处理发现主要问题是当镁合金工件由于铸造、机加工等原因而初始表面质量较差时，进行微弧氧化极容易表面局部烧蚀，造成工件报

废。因此，研制基于智能控制并能适应镁合金微弧氧化过程需要的大功率微弧氧化专用电源，能减少对工件表面质量的要求，实现幅值、频率、占空比等重要电源参数的独立调节，适应不同微弧氧化表面处理工艺的要求。

通过本课题的研究，将为镁合金微弧氧化技术的产业化装备开发和工艺研究提供理论依据，为我国的镁合金产业从资源优势转化提供技术支持。无论是从应用前景，还是从实用价值来看都既有其重要的理论意义，也有其重要的实际意义。

## 1.5 课题研究内容

镁合金的应用面临许多问题，如镁合金的腐蚀、其表面膜的腐蚀及耐蚀性等。微弧氧化技术是目前导电材料表面改性技术中的一个研究热点，这项技术可以在铝、钛、镁、锆等金属及其合金表面形成具有一系列特别优异性能的陶瓷膜层。微弧氧化膜具备了阳极氧化膜和陶瓷喷涂层两者的优点。

目前，国内外对微弧氧化技术的研究工作以铝合金微弧氧化的研究比较系统、成熟，在工业生产中已经有了较多的应用。镁合金微弧氧化技术的研究近年来虽然也取得了一定的成果，但还存在一些问题。例如，镁合金微弧氧化的成膜机理和膜层生长过程仍然需要进一步的探索；负载特性的研究又关系到工业化大功率电源的研制。

针对上述问题，本课题的研究内容如下：

1. 根据实验现象分析镁合金微弧氧化膜层的形成机理，并建立与之相符的膜层生成模型，讨论电解液成份、浓度、电参数等各因素对微弧氧化成膜速率和膜层性能的影响。
2. 探讨镁合金在微弧氧化过程中的特性规律和传递函数，建立与之相符合的负载模型，为研究适合微弧氧化需要的电源打下基础。
3. 根据微弧氧化负载的特性，研究镁合金微弧氧化负载特性对电源的要求，具体包括容性负载体系对电源输出脉冲形式、电流电压控制方式、工艺参数等各条件的要求。
4. 根据负载电特性特点设计适合微弧氧化需要的大功率电源，设计符合要求的主电路形式和系统控制软件，并验证其稳定性和可靠性。

## 第 2 章 镁合金微弧氧化微区放电机理研究

镁合金表面的微弧氧化过程，是一个十分复杂的过程，包含初期氧化膜的形成和后期的微弧氧化膜层的再击穿，最终在镁合金的表面形成稳定的微弧火花放电，并且这一过程受基体本身材质、电解液参数以及电源参数的影响<sup>[48]</sup>。

在本章中，通过控制微弧氧化的时间来获得各氧化阶段的镁合金微弧氧化陶瓷膜层，研究陶瓷膜层的生长速度、膜层的形貌，总结出镁合金微弧氧化的过程，提出镁合金微弧氧化微区放电机理，并建立镁合金微弧氧化电弧放电模型，为制备高性能的氧化膜以及微弧氧化氧化电源的研制提供理论依据。

### 2.1 镁合金微弧氧化成膜过程分析

#### 2.1.1 膜层生长速度

为了研究恒流方式下镁合金微弧氧化陶瓷层的生长速度，我们在硅酸盐的电解液体系中，频率为 700Hz，占空比为 20%的条件下进行微弧氧化实验，分别测量微弧氧化处理 2.5、5、8、10、12、14、16、18min 时陶瓷层的厚度，得到图 2.2 膜层厚度与氧化时间的关系曲线。从图中可以看出，随氧化时间的延长，所获得膜层的厚度增加，而且膜层生长速率随氧化时间的增加而逐渐减小，而不是以恒定速率进行，即膜层总厚度并不是随氧化时间线性增加的。此外，反应开始阶段的速率变化比较明显，反应后期速率变化趋缓。

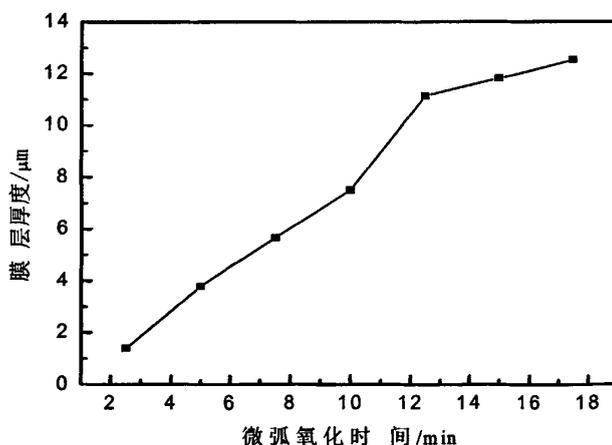


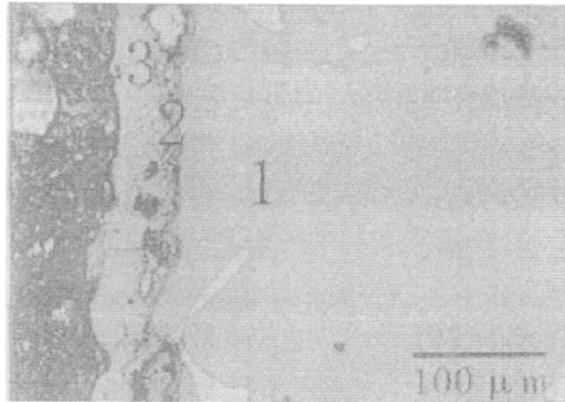
图 2.1 氧化时间与膜层厚度的关系曲线

镁合金微弧氧化膜层的上述生长规律，是与微弧氧化过程中观察到的表面弧光变化密切相关的。反应初始阶段，微弧弧光较小，数目较多，每个弧光存在的

时间很短，因此可以观察到弧光在样品表面不断地跳动。在密集弧光放电的作用下，弧光总强度较大，膜层的增长速率较快，但单个弧光强度较小，向内氧化深度较小，因此膜层以向外生长为主。随着氧化的进行，样品表面生成的氧化膜逐渐增厚，击穿变得越来越困难，弧光数目逐渐减少，弧光总强度减小，膜层增长速率减慢，但单个弧光强度增大，向内氧化深度增加，从而后期以向内氧化为主。

### 2.1.3 膜层形貌分析

图 2.2 为 AZ91D 镁合金微弧氧化 18 min 的陶瓷膜截面 SEM 形貌。

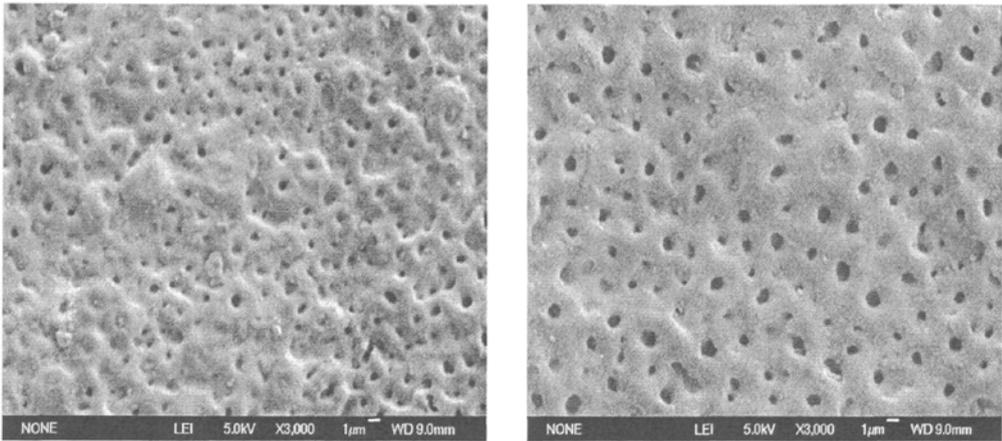


1 基体, 2 致密层, 3 疏松层

图 2.2 AZ91D 微弧氧化陶瓷膜的截面形貌

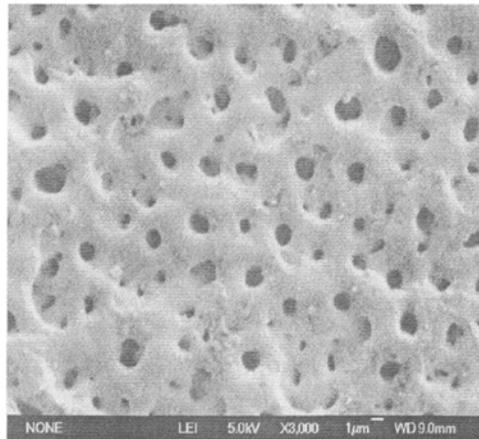
由图可以看出，微弧氧化陶瓷膜大致由疏松层和致密层组成。疏松层陶瓷膜组织较疏松，厚度较大，且存在一些孔洞；致密层陶瓷膜组织致密，与基体金属结合紧密。这是由于初期的放电过程仅发生在样品表面，此时火花细小而密集，故形成的膜层致密，观察不到气体逸出通道之类的缺陷。随着处理时间的延长，主要通过对原有膜层反复不断地击穿形成通畅的放电通道，使内层的氧化过程得以继续进行，所需的击穿电压会持续升高。随着电压的升高，氧化反应变得剧烈，产生的气体越来越多。最终，随着膜层不断增厚，火花变大且稀疏，氧化反应越来越困难，放电通道逐渐减少、且偶有增大现象，产生的气体来不及逸出就残留下来形成气孔，从而使膜层组织变得疏松且伴有缺陷。

经过不同的氧化时间之后获得的膜层的表面形貌如图2.3所示。



a) 处理时间 2.5min

b) 处理时间 10min



c) 处理时间 18min

图 2.3 不同时间下膜层表面形貌

可以看出氧化膜表面有许多熔融堆积物，大致呈不规则圆形。随着反应时间的延长，这些熔融堆积物的尺寸明显增大，导致表面起伏增大。另外，氧化膜表面上排列着大量的微弧放电残留的气孔，随着反应时间的延长数目减少，而孔径增大。这是因为在较短的微弧氧化时间内弧光的强度较小，形成的放电通道小，熔融量也少，凝固于表面时铺展的面积较大，堆积程度小(图2.3(a))；随着时间的延长，反应加剧，放电通道将扩大，同时熔融物增多，就堵上放电通道(图2.3(c))，就会使得氧化膜的击穿电压加大，微弧区的电场强度增强，又将导致熔融堆积物的量增多，如此往复的过程就是氧化膜生长的过程。并且可以看出微弧氧化膜表面的粗糙度随着处理时间的增加而增大，这与微弧氧化膜表面形貌随处理时间的变化是一致的。熔融堆积物量的多少直接决定了表面粗糙度的大小，随着微弧氧化时间的延长，熔融物堆积量的增加，使膜层表面变得粗糙。

## 2.1.2 膜层生长过程

根据实验现象分析，微弧氧化过程可以分为阳极氧化、微弧放电、大弧放电等三个阶段，膜层生长过程示意图见图 2.4。

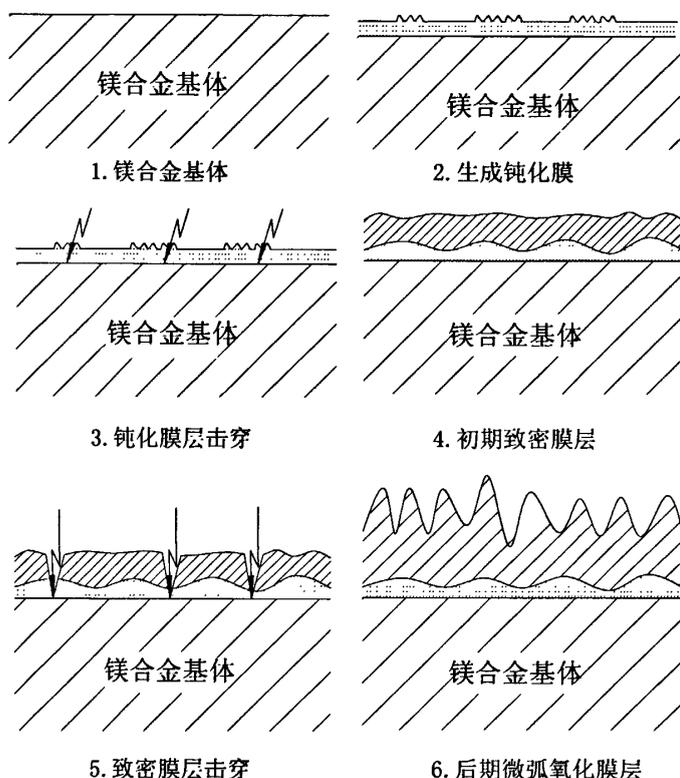


图 2.4 镁合金微弧氧化膜层生长示意图

第一阶段：阳极氧化阶段。将试样放入溶液中，接通电源以后，逐步升高两极间电压，电流也随之升高。在达到起弧电压之前，试样表面不起弧，但是有许多气泡从表面冒出。停止升高电压，发现电流缓慢减小，一直减到接近并停止于一较小值。这说明试样表面已经形成较致密的氧化膜层，随着膜层的逐渐增厚，形成致密的阻挡层，阻止电子的通过，试样表面的化学反应速度减缓，到最后一稳定状态，所以显示通过试样的电流逐渐减小。

当阳极氧化膜的生成速度与溶解速度达到平衡时，试样表面的电流密度不再减小，保持一个定值。当升高电压时，增大了阳极氧化膜内部的电场强度，促进带电粒子在氧化膜内的移动，试样表面的电流密度增大，阳极氧化膜的增长生长速度加快，氧化膜的生长和溶解平衡被破坏，表现为阳极氧化膜膜层增厚。若不再增加电压，则随着膜层的变厚，带电粒子在膜层中的运动受阻，通过膜层的电子数量减少，表面的电流密度减小，阳极氧化膜的增厚变慢，当氧化膜的生长速度和溶解速度相等时，又达到动态平衡，表现为电源面板上显示的电流值又趋于

一较小的固定值。这一层初始的阳极氧化膜对随后的过程至关重要，是试样继续进行微弧氧化的前提条件。

第二阶段：微弧放电阶段。当加于气体上的电压达到一定值（即临界电压）时，通过气体的电流剧增，气体失去绝缘的性能而被击穿，此时由于巨大的“负阻效应”而生产电弧，这就是我们观察到的电弧放电现象。试样表面开始出现亮度较低的细小电弧，火花点密度不高，无爆鸣声。由于前期生成的阳极氧化膜非常薄，经测量只要  $0.03\sim 0.05\mu\text{m}$ ，此时火花放电只能形成极少量的  $\text{MgO}$  陶瓷氧化膜。在这个阶段初期，击穿电压是一个十分关键的概念。所谓击穿电压，就是刚达到能击穿阳极氧化膜时的电压临界值。从电压参数上来说，它是普通阳极氧化和微弧氧化之间的分界点。

试样表面起弧放电之后，随着电极间的电压继续升高，试样表面的电弧形状逐渐变大，亮度增加，密度也变高。在强电场的作用下，电解液中的传质效率提高，氧化膜的溶解速度也不断提高，氧化膜的溶解及微等离子体放电造成氧化膜形成蜂窝状的孔隙结构。

钝化膜层的形成是进行微弧氧化的基础，钝化膜层厚度不均匀，电弧放电现象在膜层最薄弱区域首先出现，当电极电压超过临界电压时，氧化膜中某些薄弱部位被击穿而发生微区弧光放电现象。每个弧点存在时间很短，但微等离子体区瞬间温度非常高，并在周围区域内形成局部高压。一个脉冲周期过后，电弧在电解液的快速冷却下很快熄灭，等下一个脉冲到来时又在其它薄弱区域形成新的电弧放电现象，重复上述过程持续进行，膜层厚度也随之增长。

随着陶瓷氧化物颗粒的增多，陶瓷氧化物颗粒逐渐互相烧融连接成一起形成大颗粒的陶瓷氧化物，邻近的大颗粒陶瓷氧化物又互相烧融连接，最后形成局部陶瓷氧化膜层。在陶瓷氧化膜层的形成过程中，氧化膜表面的微等离子体放电减弱，升高电极间电压，试样表面积聚的能量越来越大，最后沿着氧化膜上的孔隙击穿陶瓷氧化膜层，等离子放电转移到氧化膜的孔隙中。这时候由于表面陶瓷层的电击穿，试样的表面电流突然增大很多。这时由于试样表面已经生成较厚的氧化膜，所以此时的微等离子放电产生的局部高温高压使氧化膜局部发生烧结晶化。随着氧化物颗粒不断烧结长大，互相重叠连续，最后完全覆盖试样表面，形成完整的陶瓷氧化膜。

在微弧氧化阶段末期，随着膜层的继续生长，又对带电粒子的运动形成了阻碍，试样表面电流密度又开始减小。新生成的无定形氧化物被微等离子体放电熔融后从放电孔隙中喷射出来，迅速凝固形成陶瓷氧化物，使陶瓷膜的厚度逐渐增厚。电压逐渐下降，试样表面的弧点变得越来越稀疏，爆鸣声停止。最后反应电压停留在一个较低的电压范围内继续进行，试样表面仍存在少量细碎火花，火花不均匀，此时对微弧氧化膜的生长贡献不大，随着时间的延长，膜层厚度并没有

明显的增加。

第三阶段：大弧放电阶段。实验发现，每个阶段的微弧氧化膜层都对应于相应的电极电压，若某一个时刻的电压过大，则会在一个或多个固定区域（试样边缘或表面缺陷部位）形成持续的电弧放电现象，称为大弧。轻微的大弧会在镁合金表面形成白斑（疏松的氧化镁），严重时会导致大面积烧蚀。一旦发生大弧，即使减小电压仍难以回复到微弧放电阶段。

## 2.2 镁合金微弧氧化成膜机理探讨

微弧氧化技术利用等离子体增强试样阳极表面发生的化学、电化学反应，并将产物迅速熔融、凝固形成陶瓷层。在固体表面进行的等离子体增强化学析出成膜多利用的是低温等离子体，具有强烈的能量释放，具有几万度的温度，并具有强烈的弧光放电<sup>[49]</sup>。这种等离子体是由电子、离子、原子、分子或自由基等粒子组成的集合体，在聚集态上也称为物质的第四态，宏观上表现为电中性的导电流体，作为一个带电粒子体系表现其集体行为，受电场、磁场的影响与支配，即会受到溶液电导率以及正向电压、负向电压、脉冲频率的影响。

根据前人对微弧氧化机理的研究，借鉴已有的离子-电子固体电解质理论<sup>[50]</sup>，并综合连续雪崩模型、Konopisov 模型、杂质中心放电等模型<sup>[51]</sup>，认为陶瓷层生长过程中，施加控制电压时，镁合金试样处于阳极状态，主要通过等离子体电流导电。镁合金试样处于阳极状态时与电解液中离子-电子作用的综合过程，示意于图 2.5。

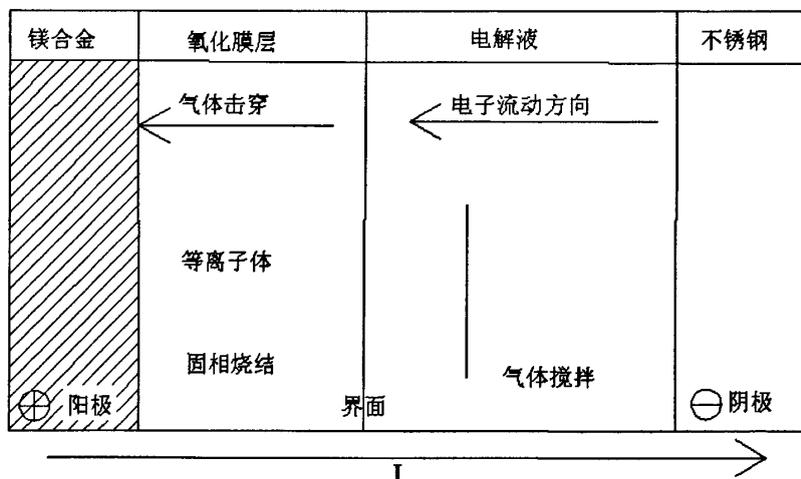


图 2.5 微弧氧化电子运动示意图

由图 2.5 可知，微弧氧化过程中，伴随着电解液中水的电解，镁失去电子氧化为镁离子进入电解液中，镁合金试样（阳极）的表面放出氧气，试样的表面有大

量气泡产生, 气体与基体金属发生反应生成疏松多孔的氧化膜层, 膜层孔洞中会继续产生气体, 气泡的一端是基体金属(作为阳极), 另一端是电解液(作为阴极), 施加控制电压会在气泡的两端形成高强电场, 氧气将在这一区域电离击穿为等离子体。在正向脉冲高压电流作用下, 试样表面吸附的等离子体放电中心向陶瓷层注入电子  $\text{SiO}_3^{2-}$ , 并在初始氧化膜表面留下了许多截留空穴, 这些空穴在电场的作用下向“类阴极”漂移, 从而增强附近的局部电场, 有利于电子的持续注入和载体的倍增, 再引发更大雪崩和更多截留空穴的产生, 直至发生极限雪崩, 从而导致产生更多的等离子体。这些等离子体随微弧氧化过程的进行表现为快速游离的放电火花或均匀细致的等离子微区放电弧光。

在氧等离子体轰击作用下, 阳极表面原有多孔的氧化膜被击穿,  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{O}^{2-}$  会被强烈地吸引到阻挡层和基体表面之间形成了沿陶瓷层厚度方向互扩散运动, 带负电的胶态粒子  $\text{SiO}_3^{2-}$  以及截流空穴, 会在高电场的作用下加速吸附在试样表面形成沉淀核心, 又为氧分子的极化吸附和形成等离子体放电中心进一步创造了便利条件, 更利于陶瓷层的增厚和晶相的形成, 使得陶瓷层不断生长。由于等离子体中电子载能能力强, 具备很强的局部加热作用, 可以增加离子动能, 促进离子扩散与氧化物烧结成陶瓷层, 并使得表面溅射出的离子与表面吸附的沉淀离子混合, 在电解液中淬冷凝固形成陶瓷层相。

在脉冲作用后, 镁氧化物在试样表面发生再沉积作用, 占据填充了原有的陶瓷层中的微孔, 从而增加了阳极膜上的电压降, 此时若要被再击穿需要更高的正向电压加载。使得气体上所分得的电压降超过气体的离解电压, 电场强度最大的地方则将出现电晕放电, 气体柱孔底的气体首先被击穿, 发生局部电子雪崩, 邻近区域的固体阻挡层最薄弱处继而被介电击穿, 在镁合金与电解液之间就产生少量游移不稳定的白色碎火花放电。由于放电存在时间很短, 就表现为“瞬间爆炸”特征, 引起氧化物蒸发及等离子化, 使得放电通道空间压力变小, 从而很大程度上扩展放电通道, 促进其内的物质输送。“爆炸气体”、熔化的粒子从放电通道进入溶液体系, 并在正向脉冲重新加载时, 在微孔壁和微孔底部结晶、凝固、沉积, 引起溶液体系中金属离子深度的变化。击穿的邻近区域的温度越高, 击穿的几率就越大。

由此可见, 微弧氧化的电极过程是一个在金属/氧化膜/气体/电解液四相体系中, 热化学、电化学、等离子体化学同时连续进行的多步骤、多层次的复杂过程。

## 2.3 镁合金微弧氧化微区放电模型

### 2.3.1 微区放电模型

随着水的电解，试样表面裂纹、气孔等微通道中产生氧气气泡并逐渐长大。此类气体放电属于介质阻挡放电类型，气泡的下端承受镁合金基体的正电压，气泡上端跟电解液接触承受负电压<sup>[52]</sup>。在外电压的作用下，气泡中少量的正负离子运动加剧，并相互碰撞使运动离子数目大大增加，这些离子在电场中的定向运动就形成电流。随着电极电压的升高，系统中反应气体的状态经历三个阶段的变化，即由绝缘状态逐渐至击穿最后发生放电。当供给的电压比较低时，虽然有些气体会有一些电离和游离扩散，但因含量太少电流太小，不足以使反应区内的气体出现等离子体反应。随着电极电压逐渐提高，反应区域中的电子也随之增加，两电极间的电场比较低时无法提供电子足够的能量使气体分子进行非弹性碰撞，缺乏非弹性碰撞的结果导致电子数不能大量增加，因此反应气体仍然为绝缘状态，此时的电流随着电极施加的电压提高而略有增加，但几乎为零。继续提高电极电压，气体将因为离子化的非弹性碰撞而大量增加，当空间中的电子密度高于一临界值时，便产生许多微放电丝导通在两极之间，同时系统中可明显观察到发光的现象，此时电流会随着施加的电压提高而迅速增加。

当绝缘膜上某一薄弱处的气泡在强电压下被击穿，击穿时电子碰撞的能量将使这部分气体解离并形成通道。在局部高温高压环境下，处于熔融状态下的镁合金基体材料从通道中喷发出来，因此试样表面在电镜观察下呈现类似火山口的形貌。随着离散的气泡在阳极表面不断放电，明亮的细碎的微火花也在试样表面跳跃，火花数量多时布满整个试样表面。此阶段微弧氧化膜快速生长，膜层电阻快速升高导致电流快速下降，为达到预定的电流密度，需不断升高电压。

微弧氧化膜层是由一系列离散微区电弧放电产生的金属氧化物累积形成，瞬间完成的微小区域内的电弧放电，使生成的氧化物经历骤热骤冷过程，从而可获得非平衡组织结构的金属氧化物膜层，达到表面改性的目的。电弧本质上是气体在强电场作用下被电离、由绝缘体变为导体的过程中强烈负阻效应，而产生剧烈光、热辐射的现象。因此，产生微区电弧放电有两个必要条件：存在气体并承受强电场。根据微区放电模型可以将微区电弧放电划分为如下4个过程：

1. 电解。电解质水溶液的电解效应，使作为阳极的镁合金表面导电通道内析出气体，试样表面微小通道中气泡逐渐长大。金属表面是通过导电通道与溶液导电，通道几何形状难以精确描述，图 2.6(a)中仅作示意。气泡的下端承受来自镁合金基体的正电压，气泡上端跟电解液接触承受负电压。气体成分以  $O_2$  为主，并受电解液成分影响。

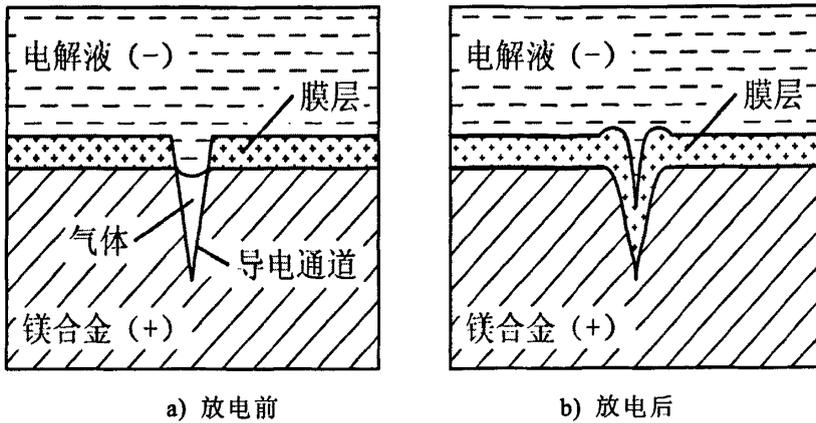


图 2.6 镁合金微弧氧化微区电弧放电模型

2. 放电。当析出的气体填满导电通道后，气体将隔绝导电通道，从而承受电源输出电压。氧气气泡中一般都含有少量正负离子，在外施电压的作用下，离子加速运动，在碰撞中离子数目大大增加，这些离子在电场中的定向运动就形成电流。随着电极电压的升高，如果通道内气体的电场强度高于其电离能，气体将发生电离，引发电弧放电。

3. 氧化。随着离散的气泡在阳极表面不断放电，明亮的细碎的微火花也在试样表面跳跃，火花会布满整个试样表面。电弧放电产生的局部高温，使通道内的金属（主要为 Mg）剧烈氧化，氧化反应产生的热量会进一步提高局部温度，生成的熔融态氧化物体积大于原通道体积，会发生类似火山喷发现象，将金属氧化物喷出通道，使得微弧氧化膜层增厚。

4. 冷却。气体被氧化反应完全消耗后，电弧和氧化反应同时终止。巨大的温差使熔融态氧化物急剧冷却、体积收缩，从而留下类似火山口的表面孔洞，如图 2.6(b)所示。

### 2.3.2 关于模型的重要推论

根据微区电弧放电模型，导电通道内气体的电场强度高于其电离能是产生微弧氧化起弧的充要条件，因此得到以下推论。

1. 电解液成分通过改变通道内混合气体的电离能，影响微弧氧化的起弧电压。如电解液中加入  $\text{K}\text{aF}$ ，会使气体中动态包含  $\text{F}_2$  成分，混合气体的存在会降低起弧电压。

2. 溶液温度升高，导致气体温度升高、电离能降低，从而使起弧电压降低。由于电弧会使放电微区周边温度升高，故相同条件下，放电微区附近的导电通道更容易产生微区电弧放电，这种现象的极端状态便是在固定部位产生持续电弧，即大弧。可见，大弧倾向有其必然性，而抑制大弧倾向的有效方法之一是延长微区放电过程的冷却时间。

3. 镁合金表面必须存在一定厚度的初始膜层。膜层太薄时，导电通道多、表面电阻低，有限容量的电源难以使通道内气体的电场强度满足起弧要求。初始膜层可由阳极氧化工艺完成。

4. 除电源电压外，影响电场强度的主要因素为导电通道的结构和几何形状，它们与镁合金基体材料、组织以及膜层结构、厚度等密切相关。随着膜层增厚，导电通道深度增加，起弧电压增加，因此须增加电源电压。

5. 电源电压高于起弧电压的部分称为过电压。过电压使许多导电通道的气体同时满足起弧条件，故而同时发生微区电弧放电。保持适当的过电压可使微弧氧化过程连续进行、并能提高成膜效率，而过高的过电压则会增加大弧倾向。

6. 除容量外，微区电弧模型对镁合金微弧氧化电源的要求为：具有可调的输出电压，本文实验条件下为 0~450V，以满足起弧和过电压要求；可控的微区放电的冷却时间，以避免出现大弧放电。

## 2.3 微弧氧化成膜条件分析

### 2.3.1 电解液要求

溶液配方的选择要求既要有维持氧化膜及随后形成的陶瓷氧化层的电绝缘特性，并使之有利于微弧的形成，又要使微弧氧化的产物尽可能的滞留在材料表面，对于自身不易氧化或不易生成完整的有电绝缘特性氧化物的金属材料，还应该在溶液中加入某些可生成电绝缘特性氧化膜的物质以促进氧化层的生成。溶液的浓度对陶瓷氧化层的生成也有影响，同时还直接影响到的电参数的选择。目前主要应用铝酸盐，磷酸盐和硅酸盐三种体系的溶液配方，其各组成成分和含量如下表：

其中：铝酸钠、磷酸钠、硅酸钠，为主成膜剂是碱性的弱电解质，为电解液提供了半导体溶液；氢氧化钠是用来调节 PH 值的，因为镁合金在偏碱性的溶液中比较稳定，所以电解液应为偏碱性的；氟化钾为性能改善剂，同时还能提供氟离子，改变气体成分，影响起弧电压，另外氢氧化钠和氟化钾的加入可以加入增强了溶液的导电性能，电解液中能够自由移动的离子增多，从而降低起弧电压；甘油为辅助添加剂，可以改变液体表面张力，从而影响气泡的大小。

表 2.1 三种常用溶液体系的各组成成分的含量

体系 ↓	成分→			
	主成膜剂 (g/L)	辅助添加剂 (mol/L)	性能改善剂 (g/L)	PH 值调节剂 (g/L)
铝酸盐	8	10	13	2
磷酸盐	8	8	5	2
硅酸盐	15	10	13	2

### 2.3.2 初始膜层

钝化膜层的形成是进行微弧氧化的基础，钝化膜层厚度不均匀，电弧放电现象在膜层最薄弱区域首先出现，当电极电压超过临界电压时，氧化膜中某些薄弱部位被击穿，发生微区弧光放电现象。每个弧点存在时间很短，但微等离子体区瞬间温度非常高，并形成局部高压，由等离子体产生的氧化物高温熔融和重组，在电解液的淬冷作用下形成耐腐蚀的陶瓷相。一个脉冲过后，电弧在电解液的快速冷却下很快熄灭，等下一个脉冲到来时又在其它薄弱区域形成新的电弧微区放电现象，上述过程重复进行，膜层厚度也随之增长。若在初期不能生产钝化膜层，则电子从镁合金工件表面均匀地通过溶液流到电源阴极，此时不会形成局部高电流而产生电弧放电现象，只会造成电解液温度很快升高。

### 2.3.3 导电通道

金属表面是通过导电通道与溶液导电，首先电解质水溶液的电解效应，使作为阳极的镁合金表面导电通道内析出气体，气体填满导电通道后，将隔绝导电通道，从而承受电源输出电压。此时，如通道内气体的电场强度高于其电离能，气体将发生电离，引发电弧放电。电弧放电产生的局部高温，使通道内的金属（主要为 Mg）剧烈氧化，氧化反应产生的热量会进一步提高局部温度，生成的熔融态氧化物体积大于原通道体积，会发生类似火山喷发现象，将金属氧化物喷出通道使膜层增厚，因此导电通道的存在是微弧氧化过程得以进行的必要条件。

### 2.3.4 高压电场

电压是进行微弧氧化反应的主要条件，不但给电解水产生氧气提供能量，也是气泡击穿理论的基础条件之一。

试样在电解液中的击穿电压主要是受电解液膜层界面阻抗的影响，反映了电解液与膜层界面的阻抗性质。经实验发现，硅酸盐复合体系中试样的击穿电压要比磷酸盐体系中的击穿电压高，这种击穿电压的升高可能与所研究的体系中电解液与膜层界面的阻抗增加有关。而电解液与膜层界面的阻抗又与电解液的电导率、膜层自身的阻抗有关。所以研究击穿电压时要与溶液体系、电压脉冲形式、电极形状等因素综合考虑。

### 2.3.5 水的电解

在微弧氧化过程中，基体镁的氧化需要一个在电弧周围局部富氧的环境。当电弧击穿膜层后伴随的高温高压将镁加热到熔融状态下，需要与氧发生反应来形成氧化镁陶瓷膜层。其中，水电解产生的氧气是其中的主要来源。另外，电解水的过程也伴随着电解液中其他成分的电化学反应。

## 2.4 本章小结

本章通过对镁合金微弧氧化陶瓷层生长过程的研究，分析了镁合金微弧氧化成膜机理，提出了镁合金微弧氧化微区电弧放电机理模型，得出以下结论。

1. 镁合金微弧氧化膜层的厚度随氧化时间的延长而增加，但是膜层生长速率随氧化时间的增加而逐渐减小。膜层表面的孔洞的直径随氧化时间的延长而增大，但是膜层的表面质量越不好，疏松层的厚度也增加。

2. 根据实验现象分析，镁合金微弧氧化过程可以将其分成阳极氧化、起弧和微弧氧化三个阶段。

3. 镁合金微弧氧化过程实质是单个微区放电的统计效果，而单个微区放电是气体放电现象，当电压达到气泡的击穿电压时，就会发生微区放电现象。镁合金样品放入电解液中，通电后表面立即生成一层很薄且透明的绝缘膜，当绝缘膜上某一薄弱处与电解液界面的气泡在强电压下被击穿，击穿时电子碰撞的能量将使这部分气体离解，形成放电通道，这就是气体放电现象，随之等离子体产生，发生一系列的高温反应，生成陶瓷膜层。

4. 通过对微区放电模型的分析 and 实验的论证，提出微弧氧化成膜必须具备的几个条件是：电解液成份的要求、初始膜层、导电通道、高压电场的存在、水电解产生氧气。

### 第 3 章 镁合金微弧氧化负载特性及其对电源要求

迄今为止，国内外的研究工作虽然在电参数对微弧氧化的工艺性、成膜速度、膜层性能等方面取得一定进展，但这些研究成果并没有对电脉冲波形在微弧氧化过程中的作用、变化及要求给出明确的回答，尚不能为电源的研制开发提供指导意义。

基于以上目的，本章试图根据镁合金微弧氧化机理及其模型来研究系统负载的特性，建立负载的传递函数和电路模型，并根据负载特性研究微弧氧化对电源输出脉冲形式、控制方式及工艺参数匹配等方面的要求，为研制适应微弧氧化工艺特点的大功率脉冲电源提供理论基础。

#### 3.1 镁合金微弧氧化负载特性分析

在微弧氧化过程中，负载信号可以分为电信号（主要是电流和电压）、声信号（在微弧氧化过程中负载和溶液作用发出的声音）和光信号（击穿起弧时候的电弧光）。微弧氧化过程中由于电压和电流信号易于采集，并且是负载电抗性进行各种物理化学反应最直接的反映，因此本文从负载电压电流数据采集分析入手，来研究负载在微弧氧化不同阶段的负载特性。

##### 3.1.1 数据采集方式

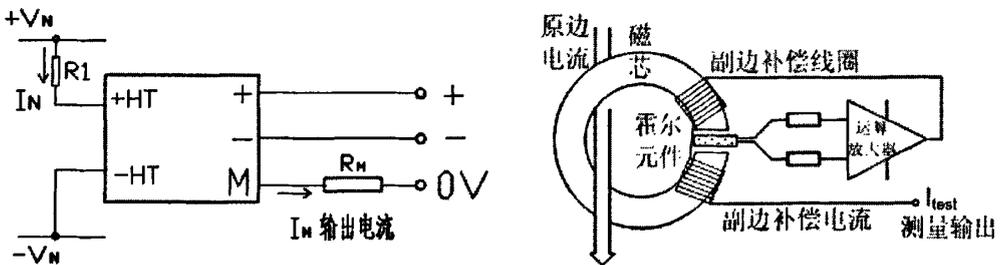


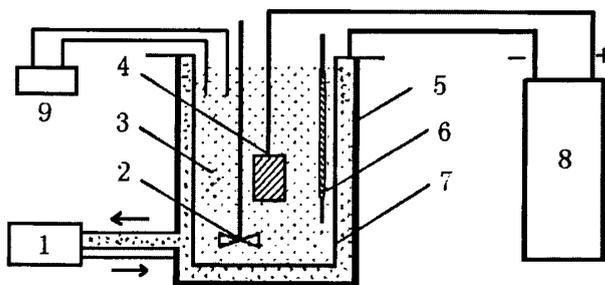
图 3.1 霍尔电压电流传感器使用示意图

电压和电流的采集时考虑到实验安全及保护示波器的角度，因此采用霍尔传感器。其基于霍尔效应，实现隔离式测量，其使用方法如图 3.1 所示。电压检测使用宇波 CHV-25P 模块，检测范围为 0~900V，据此选定限流电阻为 11K $\Omega$ /25W，采样电阻 100 $\Omega$ ，电压霍尔输出 0~50mA 电流信号，在电阻上产生电压降  $U_I$  为 0~5V。负载输出电流范围为 0~400A，故检测电流时，选择 KT500AIP 型电流霍尔传感器，采样电阻 10K $\Omega$ ，电流霍尔输出 0~10mA 电流信号，在电阻上产生电压

$U_2$ 降为 0~10V。导线从传感器的通孔中穿过，工作电源±15V。注意令导线电流的方向和传感器标注的方向相同。实际负载电压  $U=400 * U(V)$ ，实际负载电流  $I=3 * I_2(A)$ 。

### 3.1.2 实验条件与方法

研究表明，镁合金在相同电源模式，但是不同体系的溶液中进行微弧氧化实验时具有不同的反应过程，即负载表现出不同的电特性。因此在进行本实验时首先要限定相同的条件，具体为溶液成分、溶液温度、槽子形状大小、工件形状、处理方法都相同。本实验中使用的溶液为强碱弱酸盐，其配方 (g/L): 12Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, 12KF, 4 NaOH, 溶剂为蒸馏水。溶液保持恒温的方法为增加循环冷却系统，促进热量向外传导。试样采用 AZ91D 压铸镁合金，试样大小为 r=12.5mm, h=8mm, 试样作阳极，不锈钢电极做阴极，图 3.2 为微弧氧化装置示意图。所使用电源为本课题组自行研制的 MAO220 多功能微弧氧化电源，最大输出电流 400A，最大输出电压 550V，最大功率 220KW，可同时或单独输出正负脉冲。



1-冷却水循环散热装置 2-搅拌器 3-电解液 4-镁合金阳极 5-微弧氧化电解槽 6-温度计 7-不锈钢阴极 8-微弧氧化电源设备 9-溶液电导率检测仪

图 3.2 微弧氧化装置示意图

首先测量空载时电源的输出波形，由于没有接入负载不能构成回路，因此在示波器上只有电压波形，调节电源输出电压，使其输出电压值为 50V、100V、150V、250V、300V、400V、500V，同时将示波器接在电源的输出端，将不同电压下的波形用示波器记录下来，观察电流电压的变化规律；然后把试样放入溶液中，在以上实验条件下进行微弧氧化实验，并用示波器每隔一分钟记录一次波形，观察在微弧氧化过程中电流电压的变化规律，据此分析微弧氧化过程中负载的特性。

### 3.1.3 负载传递函数

传递函数是描述线性系统动态特性的基本数学工具之一，经典控制理论的主要研究方法，如频率响应法和根轨迹法都是建立在传递函数的基础之上。系统的

传递函数与描述其运动规律的微分方程是对应的。可根据组成系统各单元的传递函数和它们之间的联结关系导出整体系统的传递函数，并用它分析系统的动态特性、稳定性，或根据给定要求综合控制系统，设计满意的控制器。

传递函数的推导方法为：测量在不同电压下进行微弧氧化实验时的电流值，根据欧姆定律： $[R] = \frac{[U]}{[I]}$ ，可以求出关于电阻  $R$  的一组数列，对此数列拟合函数，

可以求出其函数式，可根据函数的形式分析负载阻抗的主要特点。

表 3.1 频率 700，占空比 20% 时的电压电流测量值

时间(min)	电压(V)	电流(A)	阻抗( $\Omega$ )	膜厚( $\mu\text{m}$ )
5	200	5.1	39.2	5.043
10	240	5.7	42.1	7.514
15	280	6.0	46.7	8.557
20	320	5.8	55.2	11.757
25	360	5.7	63.2	15.857
30	400	6.0	66.7	20.729
35	440	6.4	68.4	23.351

设置本实验室自行研制的多功能微弧氧化电源在输出单极性脉冲模式，频率为 700Hz，占空比 20% 的情况下进行微弧氧化实验。起始电压为 200V，记录其在微弧氧化过程中电压和电流值（如表 3.1 所示），根据欧姆定律  $R = \frac{U}{I}$  计算出负载的阻抗，并画出阻抗随时间的变化规律。

从图 3.3 可以看出，随处理时间的增加，系统的负载阻抗是逐渐增加的。在前 15min 内负载阻抗增速较小，增速较大的是 15~25min 这一段，在 25min 以后增速又放缓，并趋于一稳定值。分析其原因，主要是在微弧氧化前期微弧氧化膜虽然由于钝化膜层这个起始条件的存在而增长较迅速，但是由于此时生成的膜层主要是疏松层，膜层表面主要为蜂窝状的孔隙结构，其表面致密度较低，导电离子容易通过而使阻抗较小。在 15~25min 这一阶段，开始氧化膜表面的微等离子体放电减弱，但随着电极间电压升高，试样表面积聚的能量越来越大，最后沿着氧化膜上的孔隙击穿陶瓷氧化膜层，等离子体放电转移到氧化膜的孔隙中。这时由于试样表面已经生成较厚的氧化膜，其阻性增大较快。在最后阶段，试样表面已经形成较致密的氧化膜层，形成致密的阻挡层而阻止电子的通过，试样表面的化学反应速度减缓，到最后一稳定状态。此时虽然电极电压升高，但前期生成的致密微弧氧化膜层较难被再次击穿，因此长膜较慢，阻抗增速也较缓，并逐渐趋于一个稳定值。绘制此实验下膜厚随时间的变化，观察发现阻抗与膜层厚度的变化规

律基本是一致的。

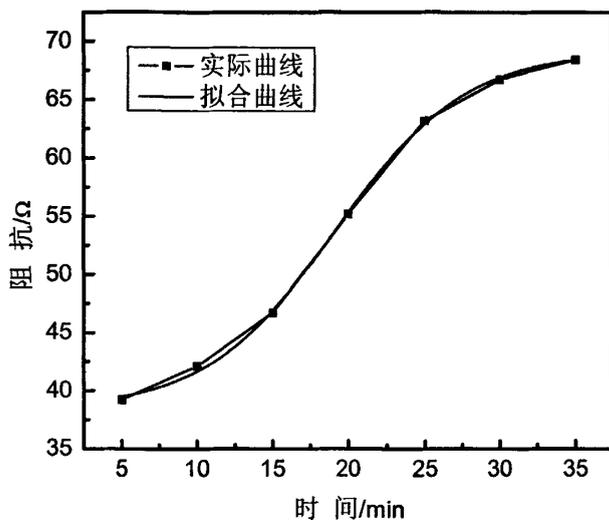


图 3.3 负载阻抗随时间的变换规律

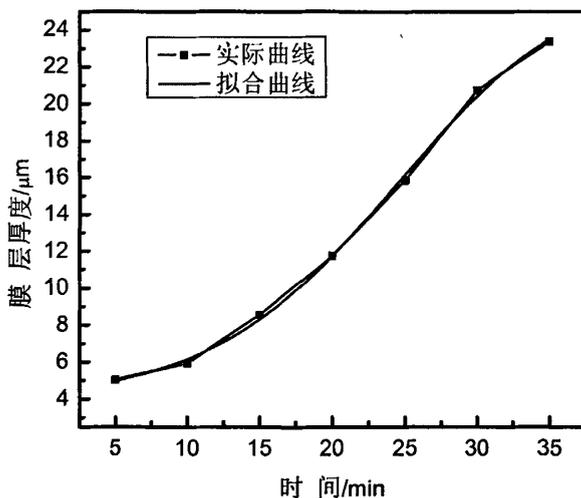


图 3.4 膜层厚度随时间的变换规律

对负载阻抗用 MATLAB 软件进行函数拟合得到下式：

$$Z = -0.0018t^4 + 0.0620t^3 - 0.9255t^2 + 6.5665t + 22.8000 \quad (3.1)$$

### 3.1.3 负载电路模型

要分析一个系统，首先要建立描述该系统基本特性的电路模型，然后用数学方法进行求解，并对所得结果进行物理解释、赋予物理意义。在描述系统时，通常可以采用输入输出描述法或状态空间描述法<sup>[53]</sup>。输入输出描述法着眼于系统输

入和输出之间的关系，适用于单输入、单输出的系统。状态空间描述法除了可以描述输入与输出之间的关系，还可以描述系统内部的状态，即可用于单输入、单输出的系统，也可以用于多输入、多输出的系统。对于微弧氧化负载系统，主要应用状态描述法，即在微弧氧化不同阶段，在不同的输入电压电流等信号时，采集相对应的输出信号。

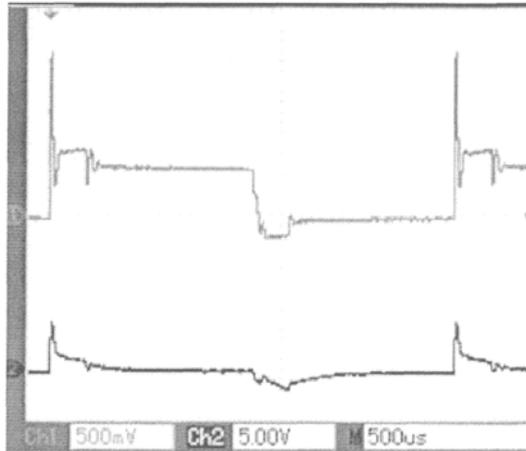


图 3.5 双极性脉冲下实际电压、电流波形

从图 3.5 可以发现，每一个脉冲周期内根据电压、电流波形可将微弧氧化过程分为两个过程。第一个过程为微弧氧化膜生长初期，此时电流随脉冲电压前沿的增长而突变，两者变化基本相同；随后电压维持在均值附近但此时电流逐渐减少，故负载呈现电阻特性，主要为膜层阻抗增加。第二个过程为负载上的电压维持在均值以下一个阶梯值，但此时负载中电流为零，故负载还应具有蓄电池特性。随着负脉冲的到来，正电压被逐渐下斜拉到负电压均值，此时电流方向相反显示为负值，随后电压电流变化与正脉冲反向相似。此过程说明系统中电压的变化规律与电容的充放电过程相同，故微弧氧化系统中存在分布式电容性元件。

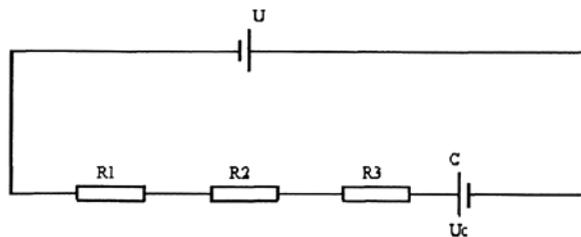


图 3.6 微弧氧化负载模型等效电路

上图中  $U$  为电源电压， $R_1$  为电解质溶液电阻， $R_2$  为合金件电阻， $R_3$  为微弧

氧化膜层电阻,  $C$  为形成的虚拟电容,  $U_c$  为电流通过该电容形成的电压。

使用等效电容的方法, 将微弧氧化过程简化为如图 3.6 所示的等效电路。

依据等效电路图, 则有:

$$U + U_c = J(\tau)S(R_1 + R_2 + R_3) \quad (3.2)$$

$$U_c = U_0 + \frac{S \int_0^t J(\tau) dt}{C} \quad (3.3)$$

式中:  $U_0$  为虚拟电容初始电压, 初始值为 0 (V);  $J(\tau)$  为时间时的电流密度(A/m<sup>2</sup>);  $t$  为时间(s);  $S$  为试样通过电流的面积(m<sup>2</sup>);

当  $U_0 = 0$  时, 则:

$$U_c = \frac{S \int_0^t J(\tau) dt}{C} \quad (3.4)$$

当一侧覆盖层厚度为  $h$  时, 覆盖层电阻  $R_3$ :  $R_3 = 2hR$

式中  $R$  为单位距离覆盖层电阻。

因此:

$$h = \frac{U + S \int_0^t J(\tau) d\tau - J(t)(R_1 + R_2)S}{2R} \quad (3.5)$$

公式 3.5 即为微弧氧化过程中工艺参数对覆盖层厚度影响的理论模型。

## 3.2 负载特性对电源的要求

镁合金微弧氧化过程中整个负载系统主要表现出明显的阻性和容性。阻性主要是膜层电阻随着微弧氧化陶瓷膜的生长而增长, 容性为电解液容性系统产生, 其值在整个微弧氧化过程中变化不大。因此, 微弧氧化负载特性对电源的要求为根据膜层生长特性和系统的负载阻抗性能研究其对电源脉冲形式和过程控制方式的影响, 来设计符合镁合金微弧氧化需要的电源和确定适合其特性需要的工艺参数匹配。

### 3.2.1 对脉冲形式的要求

微弧氧化处理过程中受到电参数、溶液成分、处理温度等诸多因素的影响, 进而影响到陶瓷层的性能<sup>[54]</sup>。结合前期研究结果作者认为: 影响镁合金微弧氧化的因素主要有两个方面, 一是溶液体系本身, 二是电源的选择。从二十世纪六十年代微弧氧化技术产生至今, 无论是微弧氧化工艺的电参数还是电解液参数都经历了许多变化。从电源特征看, 最早采用的是直流或单向脉冲电源, 随后采用了交流电源, 后来发展为不对称交流电源<sup>[55-57]</sup>。目前微弧氧化所采用的电源模式是同时施加正、负脉冲的双极性脉冲电源, 可见不同的电源形式是影响微弧氧化过程及所生成的陶瓷膜的结构和性能的重要因素。但是以往的研究主要是针对不同

电源形式下的工艺性研究，而对不同的电源的作用并没有做出明确的定义。因此根据镁合金微弧氧化过程中负载所表现的特性来研究其对电源的要求非常关键。

本文的研究思路是使用不同形式的电源进行微弧氧化实验，根据实验现象和结果来比较不同的脉冲形式的作用。因此，分别使用直流电压、单极性脉冲、双极性脉冲、增加放电回路的脉冲等四种方式来进行微弧氧化实验，对比各种电源脉冲形式下膜层的成膜速度、膜层形貌、耐腐蚀性等，从而判断镁合金微弧氧化对电源的要求。

### 1. 直流电压

如图 3.7 所示为直流源主电路原理图，电源经整流滤波后可向负载提供直流电压。

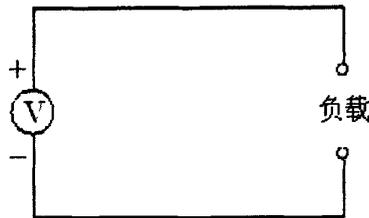


图 3.7 直流脉冲原理图

实验过程中调节电压从 0 逐渐升高至 240V，发现其表现为现象明显的 3 个阶段：

a. 阳极氧化阶段。电压在 160V 以内时，随电压的逐步升高试样表面溢出大量气泡，表面金属色逐渐消失、呈现灰白色，保持电压一定电流随时间延长而减小。

b. 微弧放电。电压升至 160V 附近，试样表面开始出现微小弧斑，发生微弧氧化，但过程极不稳定，略升高电压，便进入下一阶段。

c. 大弧放电。电压超过 180V，会在一个或多个固定区域（试样边缘或表面缺陷部位）形成持续的电弧放电现象，称为大弧。轻微的大弧会在镁合金表面形成白斑（疏松的氧化镁），严重时会导致大面积烧蚀。一旦发生大弧，即使减小电压仍难以回复到微弧放电阶段。图 3.8 为大弧造成试样烧蚀的典型形态。

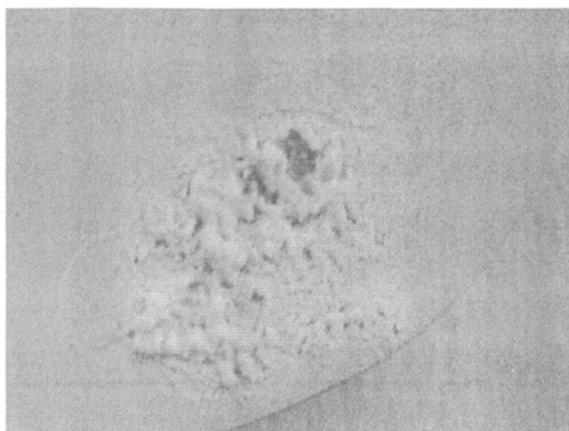


图 3.8 直流电压模式下烧损的试样

根据以上实验结果可以认为：镁合金表面首先通过阳极氧化生成初始膜层，微弧氧化在初始氧化膜层上发生；微弧氧化存在一个最小电压（起弧电压）；升高电压会产生大弧放电现象，大弧是导致镁合金微弧氧化失效的主要原因。

## 2. 单极性脉冲

图 3.9 为单极性脉冲电源主电路原理图，设频率 800HZ，占空比 20%。

电源经整流滤波后可向斩波电路提供直流，在斩波电路中通过控制电路输出脉冲去触发 IGBT，使 IGBT 在开通与关断之间切换， $V$  间断输出电压，对负载进行供电即为单极性脉冲方式，其输出脉冲时序图如 3.10 所示。

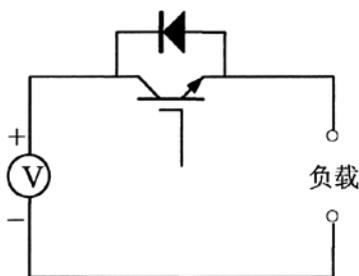


图 3.9 单极性脉冲电源主电路原理图

对比直流方式，单极性脉冲方式下的 3 阶段大同小异，差异主要表现为：阳极氧化阶段负载的等效电阻增加速度有所减小，即相同电压  $V$  下的电流  $I$  有所增加；微弧放电过程的稳定性略微改善，大弧放电倾向轻微降低，表现为大弧放电起始电压升高、大弧持续时间缩短。上述现象随脉冲频率的升高和占空比的降低越来越明显。

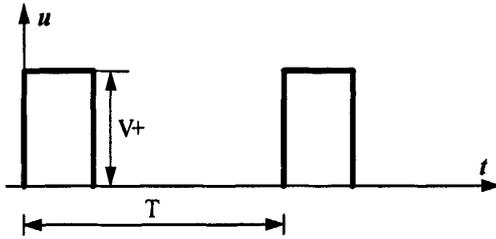


图 3.10 单极性脉冲输出时序图

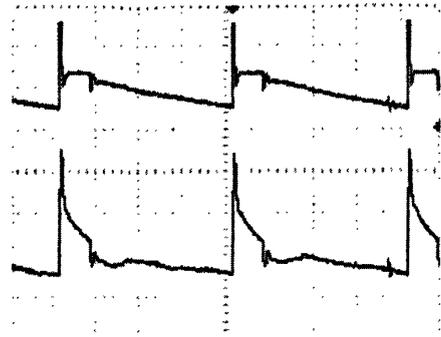


图 3.11 单极性脉冲下实际电压、电流波形图

图 3.11 为脉冲幅值电压 240V、频率 800Hz、占空比 30%（脉冲周期 1500 $\mu$ s、脉宽 450 $\mu$ s）时，单极性脉冲方式下进行镁合金微弧氧化实验，记忆示波器采集的负载电压和电流波形。可以看出，尽管电源输出为方波脉冲电压，但实际上负载电压呈现类似锯齿状波形，电流最大值出现在输出方波的上升沿。IGBT 关断期间负载电压缓慢回落，最小值约 120V，低于起弧电压（160V 左右）的时间小于 300 $\mu$ s，占比约 20%。可见，单极性脉冲输出时负载电压实际为脉动直流，其大部分时间高于起弧电压，起不到脉冲的作用，故其效果与直流方式相近。

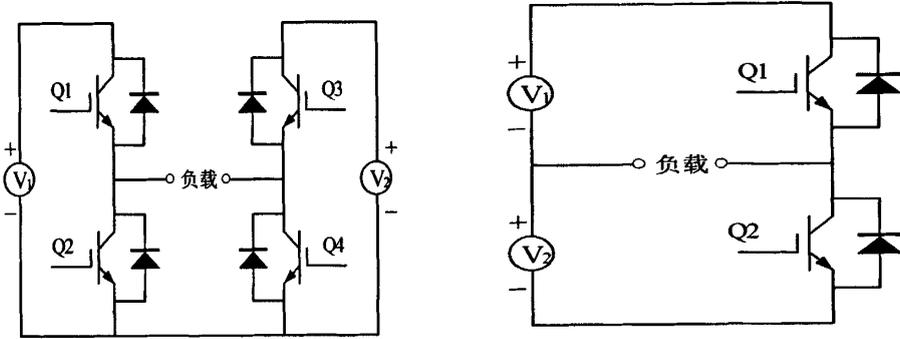
根据图 3.11 中电压电流波形，认定微弧氧化的负载特性呈现极强的电容性，这是造成单极性脉冲输出不能有效抑制大弧倾向的主要原因。进一步研究表明，负载特性由分布电容和分布电阻构成，具有非线性、时变性的特点，受电解液成分、浓度、温度、电解槽体积、电极位置、试样表面积、氧化膜厚度等诸多因素影响。如前文所述，负载特性可用一个 RC 串联结构简单等效，R 代表实功部分，包括电解、沉积等电化学反应和电阻热、电弧放电等物理效应；C 代表虚功部分，主要由电化学反应引起，同时受电解、电极、试样等物理因素影响。实验发现，其他条件不变时，微弧氧化过程中 R 会随时间延长而增加，C 则几乎不变，即膜层增厚使 R 增加。

### 3. 双极性脉冲

实验过程中设置正、负脉冲之比为 1:1，频率为 800Hz，占空比为 20%。

双极性脉冲电源又叫双向不对称脉冲电源，即正电压和负电压脉冲交替出现的脉冲形式。现在，双极性脉冲电源应用的较多，因为脉冲电压特有的“针尖”作用，使得微弧氧化膜的表面微孔相互重叠，膜层质量好。微弧氧化过程中，通过正、负脉冲幅度和宽度的优化调整，使微弧氧化层性能达到最佳，并能有效节约能源。目前国内研制的这类电源一般采用两极工作方式，由于正负电源的输出电压不同，因此它包括正、负两个电源，其输出需要不同的变压器经整流滤波后再提供给后级电路进行斩波得到正、负输出电源<sup>[56]</sup>。这种电源形式的主电路原理图如图 3.12 所示，图(a)是常用的桥式电路，正负电源经整流滤波后向斩波电路提

供直流，在斩波电路中，通过控制电路，输出两路不对称的脉冲去轮流触发两组 IGBT，从而来控制对负载的充放电过程，这种电路误导通率较高，容易烧损元器件，优点并不明显，因此实验中用运(b)所示的电路原理，脉冲去轮流触发去轮流触发两个 IGBT，其输出的脉冲时序图如 3.13 所示。



(a) 桥式双极性脉冲电源

(b) 串联式双极性脉冲电源

图 3.12 双极性脉冲电源主电路原理图

双极性脉冲形式下的微弧氧化，在正电压阶段时试样发生正常的微弧氧化，当负脉冲到来加上一定负电压时，将会产生一定的负电流，有负电流流过时相当于镁合金试样为阴极，而不锈钢为阳极，一些铁离子将被溶解到溶液中，微弧氧化时间长了就会发现溶液变混浊呈红褐色，这样将会污染溶液，并且发现试样表面有大量的沉积物，但是由于负脉冲的存在微弧氧化过程中没有连续弧产生，微弧氧化过程能够顺利进行。

当正电压为 240V，负电压为 40V 时，输出的波形如图 3.13 所示：由波形照片可以发现，在正脉冲电压作用周期下，电压变化规律和直流脉动形式一样，也是当脉冲宽带结束后电压缓慢下降。但是当负脉冲周期到来时，将电压强行拉为负，这在一定程度上会抑制连续弧的产生。负电压波形和正电压类似。此模式下电流波形与直流脉动形式相比下降幅度较小，这是因为在负电压阶段容性系统中的电量通过负回路放电，使电压突变率降低，因此电流变换率也减小。

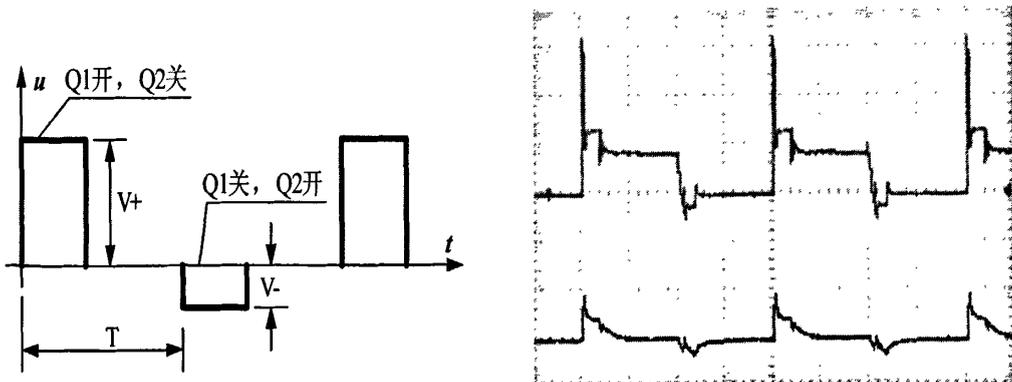


图 3.13 双极性脉冲输出时序图

图 3.14 双极性脉冲下实际电压、电流波形

4. 带放电回路的脉冲

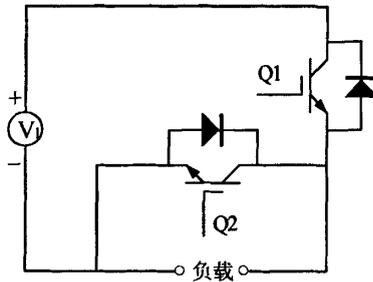


图 3.15 带放电回路的脉冲电源原理图

综上可以判断双极性脉动电源中的负脉冲能够抑制连续弧的产生，但是负电压的存在对微弧氧化过程是有害的，据此我们设计了带放电回路的直流脉冲电源形式，其电源的主电路原理如图 3.15 所示：在正脉冲宽度（Q1 闭合、Q2 关断）过后由于在负载两端增加了一放电回路（Q1 关断、Q2 闭合），使容性系统上的电能充分释放，这样就使得电压能够回零，有效降低了溶液温度并抑制连续弧的产生，其输出脉冲时序图如 3.16 所示。

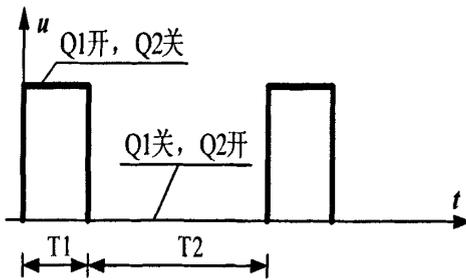


图 3.16 带放电回路脉冲输出时序图

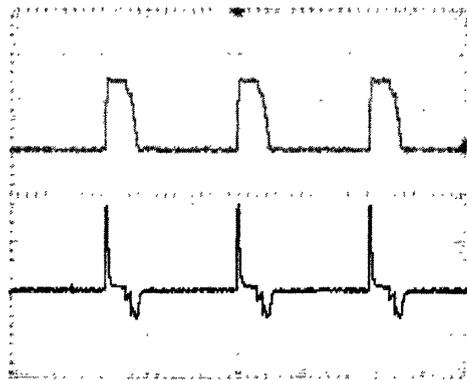


图 3.17 放电回路脉冲形式下的电压、电流波形

在频率为 700Hz，占空比为 20%的条件下进行微弧氧化，当电压为 240V 时测得输出波形如图 3.17 所示。由波形图片可以看出，在每一个脉冲宽度时间过去以后，电源中的放电回路闭合而将容性电解液系统中的电能强行放掉。在时间上将电弧两端的电压拉为零，使电弧燃烧离散化，因此不会造成电弧在时间上的连续燃烧，确保了微弧氧化过程的继续进行。并且与双极性脉冲相比，在同一个周期内脉冲增加一倍，能有效提高微弧氧化的成膜速率。

1) 对成膜速度的影响

设定两种电源形式下频率为 700Hz，占空比为 20%，终止电压为 300V 时进行

微弧氧化实验，其成膜速度比较如图 3.18 所示。由图可见随着时间的延续，膜层厚度均为逐渐增厚，但是带放电回路的直流脉冲电源形式成膜速度要明显高于双极性脉冲电源形式。分析其原因，一为双极性脉冲形式下负脉冲阶段膜层是停止生长的，并可能部分溶解，而带放电回路的脉冲形式下膜层是连续生长的；二为同样时间周期内后者的有效脉冲个数是前者的两倍，表现为单位面积电流增大，因此此模式下膜层有效生长较快。

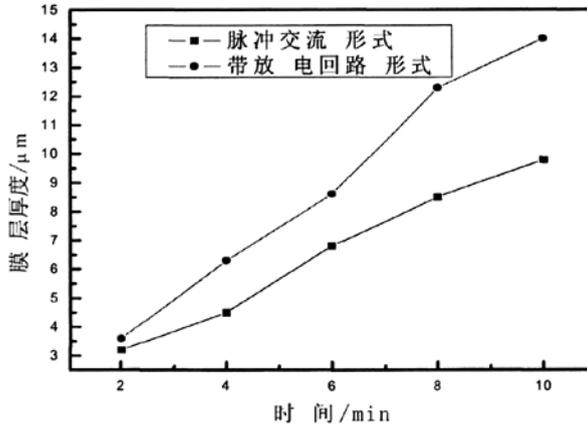
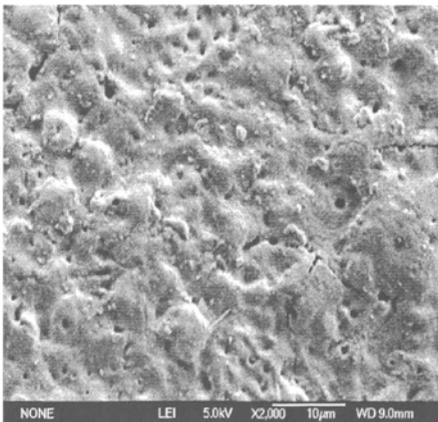


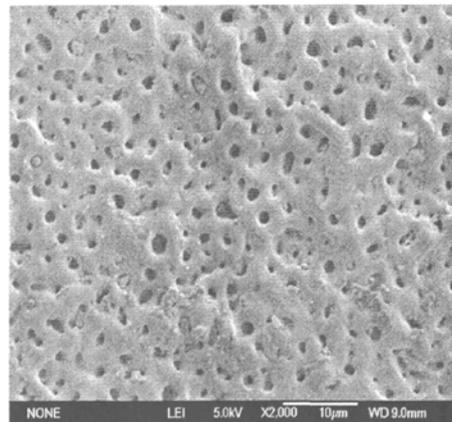
图 3.18 膜层厚度与时间关系曲线

## 2) 对膜层形貌的影响

图 3.19 为两种电源形式下微弧氧化 10min 中后膜层经扫描电镜观察的表面形貌。由图可见，带放电回路的直流脉冲处理下的膜层形貌明显好于双极性脉冲。这是由于在双极性脉冲下还是具有局部“大弧”倾向，易对试样表面造成轻微烧蚀，并且由于负电压阶段容易在试样表面形成阴极沉积，使溶液中的杂质等吸附在试样表面，后期放电通道逐渐堵塞，电弧形状变得稀疏且粒度变大，电能量集中，致使在表面形成一些粗粒陶瓷点，使表面变粗糙。



a) 双极性脉冲形式



b) 带放电回路的形式

图 3.19 两种电源形式下膜层的表面形貌

## 3) 对膜层耐蚀性的影响

根据 GB10124-88 浸渍试验标准，配制了质量百分比 5% 的 NaCl 溶液进行耐蚀性浸泡试验，考察了不同脉冲形式下制得的微弧氧化膜层的耐蚀性能。

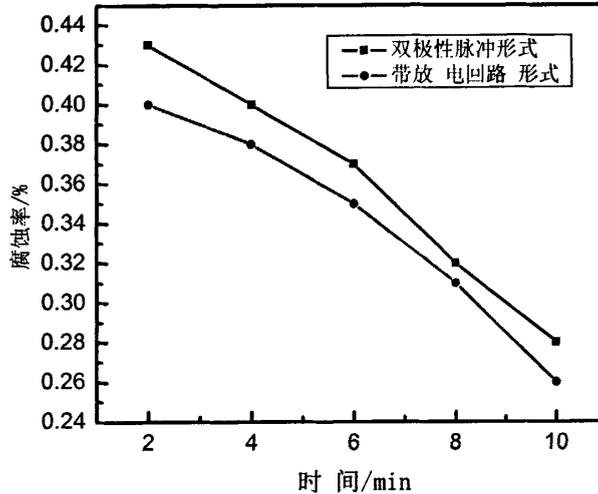


图 3.20 不同脉冲方式下膜层的腐蚀率

图 3.20 显示了不同脉冲形式下处理时间与腐蚀率的相互关系。从中看出，试样的腐蚀率都先随着时间的延长而减小，但是双极性脉冲的腐蚀率却比同等时间内带放电回路的脉冲微弧氧化处理的腐蚀率要高。试样的耐蚀性与膜层的空隙率是密切相关。一般情况下，空隙率越小，环境介质越不易通过膜层与基体接触，试样的耐化学或电化学腐蚀性能就越强。随着微弧氧化时间的增大，氧化产物不断在表面沉积，伴随着膜层变厚过程，表层孔隙也不断地得到填补，空隙率逐渐减小。但双极性脉冲由于负电压的消融作用，部分氧化膜层重新溶解在溶液中，再加上同等时间内带放电回路的脉冲形式电流密度较大、膜层较厚，因此在浸泡试验中局部点蚀相对较严重，故其耐蚀性较差。

## 3.2.2 对控制方式的要求

微弧氧化可采用恒压或恒流两种供电方式，恒压是指在试验过程中维持电压幅值不变，电流随时间变化；恒流是指在试验过程中维持电流的幅值不变，电压随时间变化。但无论哪种方式供电，相应的电压或电流将发生规律性的变化，其会对膜层厚度及性能产生较大的影响。本试验通过研究恒定电压、电流下微弧氧化陶瓷膜的生成速率来研究不同的电流电压控制方式对负载特性的影响。实验中试样材料、大小及形状、电解液成分等条件均保持一致。

## 1. 恒压模式下的膜层性能

## 1) 恒压模式下电流的变化

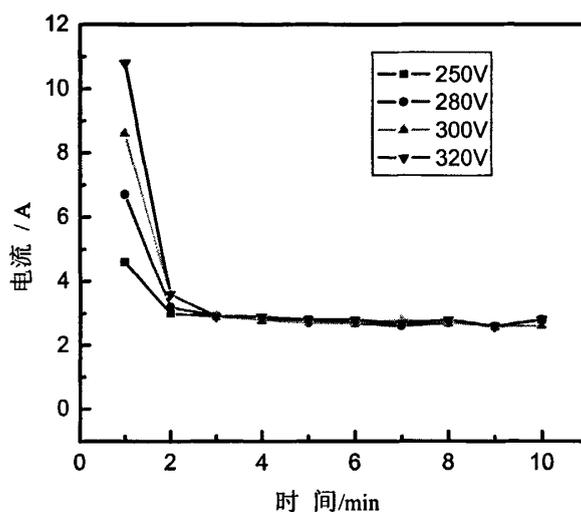


图 3.21 恒压模式下的电流变化

图 3.21 为不同电压值进行恒压供电时电流的变化情况。从图中看出，电流下降分两阶段，前期约 1~2min 之内为非稳定阶段，从加压开始电流便显著减小；后期进入稳定阶段，电流变化趋于平缓。

$$R = k \frac{\delta}{S} \Rightarrow \frac{U}{I} = k \frac{\delta}{S} \Rightarrow U = k \frac{\delta \cdot I}{S} \quad (3.6)$$

上式中： $R$ ：膜层电阻； $k$ ：电阻系数； $\delta$ ：膜层厚度； $S$ ：试样表面积； $U$ ：电压； $I$ ：电流。

此过程可以用欧姆定律来解释：试样刚放入溶液中时其表面为镁合金金属，接触电阻较小，因此电流较大；1~2min 之后，随着表面生成钝化膜层和微弧氧化膜层速度增快，电阻变大， $k$  值急剧增大，电源为维持恒压进行自我调整，电流很快减小；进入稳定阶段以后，陶瓷膜层逐渐增厚，接触电阻也逐渐增大， $\delta$  缓慢增加， $R$  也缓慢增加，电流减小速度就平缓，并至一稳定位置不再减小。

## 2) 恒压模式下膜层生长速率

为了研究恒定电压下微弧氧化陶瓷膜的生长速率，采用 TT260 数字式涡流测厚仪测量不同处理时间的陶瓷膜层厚度，并计算相应的成膜速率，得到了陶瓷膜层厚度和成膜速率随处理时间的变化规律，如图 3.22 和图 3.23 所示。

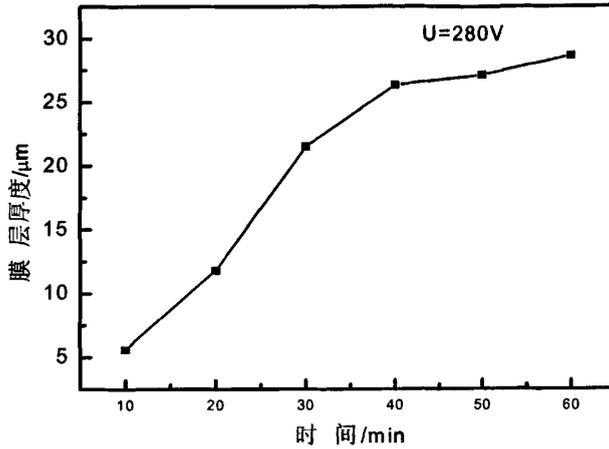


图 3.22 恒压下膜层厚度随时间的变化规律

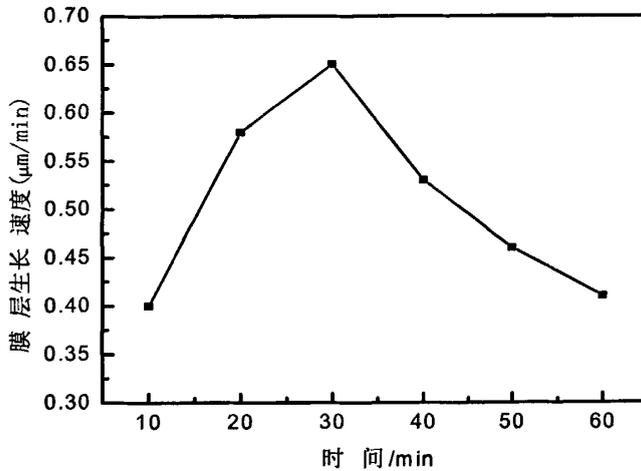


图 3.23 恒压下成膜速率随时间的变化规律

由图 3.21 可知,陶瓷膜厚度在前 30 分钟内随时间增加很快,其后膜厚增加变慢,到 60 分钟后,膜厚基本不变。由图 3.22 可知,平均成膜速率在前 30 分钟内随时间增加而迅速增加,30 分钟以后随时间的增加迅速减小。在通电的瞬间,样品表面迅速形成一层绝缘钝化膜,这层膜中的某些薄弱微区在强电场中被同时击穿,发生微弧放电现象,其后放电再转移到其它相对较薄的微区进行。与此同时,在放电过后的微区中形成了多孔氧化膜。因此,在该过程中氧化膜增长速度较快。随着微弧放电的继续和多孔氧化膜的变厚,造成氧化膜中的部分微孔被相继堵塞,使放电击穿的位置不断变少,从而造成微弧氧化膜的生长速率变慢。当氧化陶瓷膜的厚度达到设定电压下无法再击穿时,氧化膜就停止生长。

## 2. 恒流模式下的膜层性能

### 1) 恒流模式下电压的变化

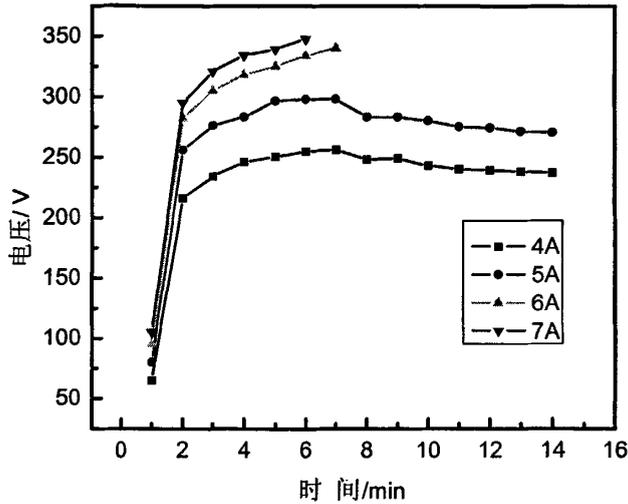


图 3.24 恒流模式下电压的变化

图 3.24 为不同电流下进行恒流供电时电压的变化情况，从图中看出：电压随着处理时间的延长而逐渐上升，电压上升过程分两阶段，即前期的急剧上升阶段和后期的平缓上升阶段。电压的变化是由于膜层不断加厚，等效电阻值不断增大的结果。

同样运用欧姆定律解释：在微弧氧化前期约 2~4min 之内，因发生电化学反应，基体表面生成微弧氧化陶瓷薄膜，造成  $k$  值急剧增大，电源为维持恒流进行自我调整，电压  $U$  很快增大；后期随着陶瓷膜层的逐渐加厚， $\delta$  缓慢增大， $R$  也缓慢增大，电压  $U$  增大速度就缓慢；当电压逐渐上升直到设置极限  $U_m$  后，电压将维持在  $U_m$  以下一定值，此后受电源功率所限电流  $I$  值逐渐减小。

## 2) 恒流模式下膜层生成速率

本节采用如上工艺参数，固定阳极正电流为 5A，分别测量了处理时间为 5、10、15、20 和 30 分钟所制备的镁合金微弧氧化陶瓷膜厚度。图 3.25 给出了氧化膜厚度随处理时间的变化规律。很明显，氧化膜厚度随处理时间的增加而近似线性增加，这条直线的斜率约为  $0.67\mu\text{m}/\text{min}$ ，它等于每分钟镁合金微弧氧化陶瓷膜的沉积速率。实验表明，在恒定电流下镁合金的微弧氧化陶瓷膜厚度与处理时间之间近似存在线性增长的关系。

由图 3.26 可见，恒定电流下镁合金微弧氧化膜的生长速率近乎不随时间变化，因此可见膜层的生长速率主要是由试样单位表面积上的电流大小决定的。因此，可在实际微弧氧化表面处理时采用恒定电流的程控方式，能大大提高处理效率。但是当工件表面积跟实验中试样表面积相差较大时，应如何选择处理电流等难点，应在以后的工作中持续探讨。

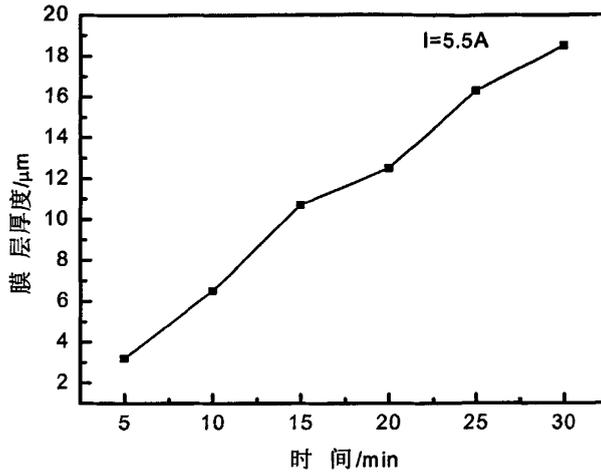


图 3.25 恒流下膜层厚度随时间的变化规律

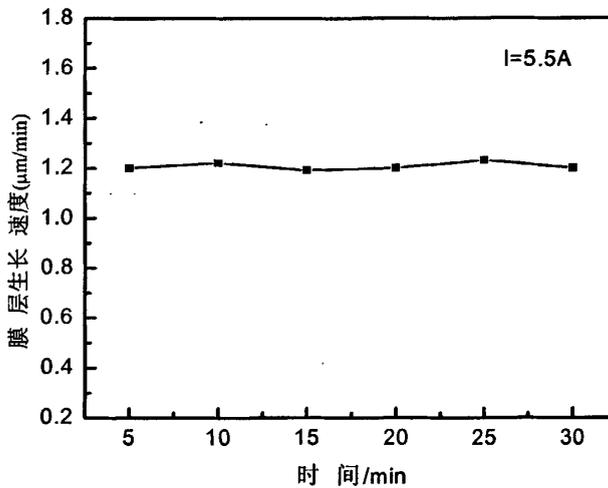


图 3.26 恒流下成膜速率随时间的变化规律

### 3.2.3 对工艺参数匹配的要求

微弧氧化是一个多种工艺因素控制的复杂过程，如电解液成份、电解液浓度、合金成份、电压、电流、温度、频率、占空比、处理时间等参数都与陶瓷膜的特性密切相关。（其中占空比是指正脉冲开通时间与正脉冲和放电回路总时间之比，其定义与其电学概念有区别，为保持概念的一致性，仍使用占空比这个称谓）。

对于微弧氧化这个复杂系统，根据负载特性研究表明，阻性和容性是其主要特点，放电回路的引入即为解决其容性在微弧氧化过程中造成电弧持续燃烧的问题。因此，需要研究脉冲作用时间与冷却时间之间的关系，寻求两者的最佳配比，实现在尽量减小容性系统的影响的情况下，最大程度的提高微弧氧化膜层的成膜效率和膜层质量。

本节的重点是在其他参数均保持恒定的情况下，设定频率 600Hz、700Hz，占空比 20%、30%、40%等常用参数下各进行微弧氧化处理 30min，分别测量膜层厚度和腐蚀率。

表 3.2 频率和占空比配比实验结果表

因素	频率/Hz	占空比/%	膜厚/ $\mu\text{m}$	腐蚀率/%
实验一	600	20	18.44	0.265
实验二	600	30	15.76	0.231
实验三	600	40	烧蚀	—
实验四	700	20	20.73	0.165
实验五	700	30	23.77	0.185
实验六	700	40	烧蚀	—

根据表 3.2 实验结果可知，在占空比为 40%时实验过程中发现试样局部烧蚀现象严重，实验中断。其余 4 组中膜层最厚的为 23.77 $\mu\text{m}$ ，最薄的为 15.76 $\mu\text{m}$ ；腐蚀率最低的 0.165%，最高的是 0.265%。进行微弧氧化表面处理的主要目的是提高镁合金的耐腐蚀性，在实验五条件下时腐蚀率最低且外观和厚度也适中，因此镁合金微弧氧化可以选择频率为 700Hz，占空比为 20%。

### 3.3 本章小结

由于对微弧氧化负载特性的研究较少，因此对于负载特性对电源的要求研究还不是十分的系统、深入。针对这种情况，本章根据微弧氧化机理、采用状态分析法研究输入输出电压电流的变化来分析系统的负载电特性，求得了负载阻抗与时间的变化规律，其函数为： $Z=-0.0026t^3+0.1527t^2-1.3775t+32.7143$ 。

通过建立负载电路模型求的膜厚与电参数的计算公式为：

$$h = \frac{U + S \int J(\tau) d\tau - J(t)(R_1 + R_2)S}{2R}$$

实验表明系统具有较明显的阻性和容性，因此采用直流、单极性脉冲、双极性脉冲、带放电回路的脉冲等四种不同的脉冲形式来研究在其作用微弧氧化陶瓷膜的成膜速率和膜层形貌。将陶瓷膜的厚度、耐腐蚀性作为评价陶瓷膜性能的指标，研究了各种影响因素对微弧氧化结果的影响，得到的结果如下：

1、实验发现在直流电压和单极性脉冲方式下具有很严重的大弧倾向，而双极性脉冲和带放点回路的脉冲模式下大弧倾向不明显，经比较发现带放电回路脉冲下的成膜速率、膜层形貌和耐腐蚀性均好于双极性脉冲模式下处理的微弧氧化膜层。

2、使用恒压和恒流两种控制方式分别进行微弧氧化实验发现，恒流模式下陶

瓷膜层的生长速率大于恒压模式下，并且其得到的膜层厚度也较高。

3、由于正脉冲宽度与放电回路时间之配比对于释放电解液系统的容性电具有较大的影响，因此在确定频率的情况下改变占空比大小来研究膜层厚度和耐腐蚀对于研究微弧氧化过程中工艺参数的配比具有较大作用，正交实验发现在频率700Hz、占空比20%膜层质量较优，此时脉冲作用时间和冷却时间之比为1:4。

## 第 4 章 具有放电回路的微弧氧化脉冲电源设计

微弧氧化电源是微弧氧化技术中的关键设备,对成膜质量具有重要影响。电源硬件设计主要根据镁合金微弧氧化膜层生长特点及其负载特性对电源的要求来设计电源硬件系统。主要包括主电路中整流电路、斩波电路和保护电路的设计,控制电路中的 SCR 触发电路、IGBT 驱动电路、采样及显示电路的设计,并对硬件系统采取多种抗干扰措施。

### 4.1 电源总体方案

设计一种带放电回路的大功率镁合金微弧氧化脉冲电源,该电源输入为 380V 工频交流电,最大输出功率为 200KW,输出在 0~500V 内连续可调的脉冲电压以及 0~400A 连续可调的任意电流波形。该电源脉冲频率、占空比精确可调,能实现精确的恒流、恒压输出特性以及对应于微弧氧化工艺的过程控制。

表 4.1 微弧氧化脉冲电源技术指标

名 称	指 标
额定输入电压(V)	3 相 380
额定输入容量(kVA)	200
镁合金微弧氧化工件表面积(m <sup>2</sup> )	0~6
额定输出电压(V)	500
额定输出电流(A)	400
最大输出脉冲峰值电流(A)	4000
输出脉冲频率(Hz)	100~1000
输出脉冲占空比(%)	10~90
使用环境温度(°C)	0~70

电源控制系统由两部分组成:电源主控制器和电源参数预置及显示器。电源主控制器主要由一个以 80C196KB 单片机为核心的单片机控制系统构成,其中包括电源工作时序、整流器、斩波器的控制电路和电源参数的采样电路;电源参数预置及显示器是由一个以 80C52 单片机为核心的单片机系统构成,其中包括对电源参数、电源特性、工作方式的预设置和电源实际电参数的显示。两个控制器之间采用串行接口进行通讯,交换数据和命令。

## 4.2 主电路设计

微弧氧化脉冲电源主电路的设计主要包括主电路形式、整流器和斩波器的选择、滤波电路和保护方式等。

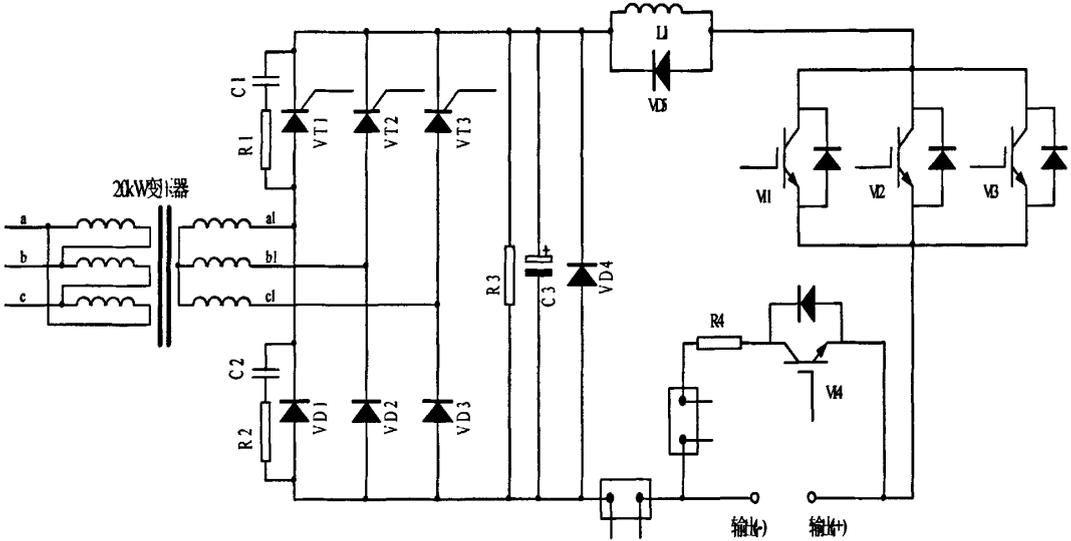


图 4.1 主电路结构图

电源的主电路采用两级式结构：前级为可控硅整流部分，包括三相可控硅整流及其触发电路设计，实现负载电压幅值在 0~500V 范围内连续可调；后级为基于 IGBT 并联的斩波电路与脉冲间隙放电回路，包括 IGBT 驱动电路以及脉冲波形发生器，输出频率、占空比、冷却时间可调的脉冲波形。放电回路工作原理为：在脉冲放电间隙期，微弧氧化容性系统的电由 IGBT  $V_{14}$  闭合放电而消耗在电感两端。

如图 4.1，三相 380V 工频交流电压经快速熔断器输入设备，电源指示灯亮，散热风扇启动。当按下常开开关 AN1 时，交流继电器常开触点吸合，控制变压器工作，输出三路分别为 220V、36V 和 12V 的交流控制电压，其中，220V 作为开关电源的供电，并且通过一个 220V 变双 18V 的变压器为采样板电源供电；36V 用于为交流继电器 JZ3 线包供电和同步电路的输入；12V 用于为 SCR 触发板的电源供电。控制系统在开关电源工作后进行自检，如果自检正常，P1.1 口输出为高，继电器板上固体继电器吸合，主回路接通，同时 JZ2 常闭触点 JZ2-1 和 JZ2-2 断开，放电回路断开；如果自检失败，则 P1.1 口输出为低，固体继电器不动作，主电路不工作。

接触器 JC1 吸合后，三相工频交流电为主回路前级供电，经过三个平波电抗器和阻容吸收电路进入前级整流电路，脉冲电源采用 380V 直接整流，最大均值为 515V ( $220V \times 2.34$ )。

表 4.2 列出了常用的电源整流形式。由此表可以看出：在这几种整流方式中，

三相半控桥式整流电路相比其他整流电路，有如下优点：

1、元件少，相应的触发系统简单，因而投资少，调整维护方便。

2、输出同样整流电压，元件  $U_{zo}$  越小，可选用更低电压元件，在高电压下，可避免不必要的串联使用。

3、输出同样整流电流，元件  $I_z$  越小，则选电流等级较低元件，这对大电流有利，可避免不必要并联使用。

4、变压器利用系数越大，在输出同样整流功率，变压器计算容量越小，越经济，对大容量影响更显著。

5、脉动率小，说明交流成分少，所需滤波器要求低。

综合这些优点，本电源的整流电路选择三相半控桥式整流电路。

表 4.2 常用的电源整流形式

整流电路	元件数量	整流电压 ( $U_{zo}$ )	整流电流 ( $I_s$ )	变压器 (利用率)	输出电 压脉动 系数	适应场合
三相 半控桥	3 个可控硅 3 个二极管 (较多)	1.05 (最小)	0.587 (较小)	95% (最大)	0.057 (最小)	各项指标较好，适用于较大功率、高电压负载
三相 全控桥	6 个可控硅 (最多)	1.05 (最小)	0.587 (较小)	95% (最大)	0.057 (最小)	元件多，触发系统复杂
六相 半波	6 个可控硅 6 个二极管 (最多)	2.09 (一般)	0.41 (较小)	64.5% (较小)	0.057 (最小)	元件多，无其它优点
带平衡电 抗器的双 反星形	6 个可控硅 (最多)	2.09 (一般)	0.289 (最 小)	80% (较大)	0.057 (最小)	电流等级最低，但增加电抗器，体积增大

由于微弧氧化工艺在工件材料相同的情况下，处理时所用的电压是相同的，所以电源的输出电流决定了电源的输出功率，而电源的输出功率决定了微弧氧化一次性处理工件的总表面积。因此，提高电源输出电流是提高微弧氧化工业化生产效率的关键。本电源中采用三块 IGBT 并联的方式提高整个电源的输出电流，也就实现了电源大功率的要求。

#### 4.2.1 功率器件选择

##### 1. 整流器选择

可控硅不仅具有单向导通特性，而且其通断电压和导通电流还受控制极控制，

它是弱电控制强电的“桥梁”，即用微弱的触发信号来开关强电电路，强电部分称为主回路，弱电部分即为触发电路，在电力牵引、电机励磁、电气传动、整流电源方面得到广泛应用<sup>[58]</sup>，因此在本设计中采用可控硅作为开关器件。

正确地选择可控硅和整流二极管，能够使可控硅装置在保证可靠运行的前提下降低成本。整流器件的合理选择主要是指合理地选择器件的额定电压和额定电流（通态平均电流）。整流器件的选择与以下各因素有关：负载性质（电阻或电感）、整流电压平均值和整流电流平均值、整流电路的形式及可控硅的控制角度等。

整流元件电压等级选择：

可控硅和二极管整流元件的反向峰值电压  $V_{RM}$  为：

$$U_{Mf} = K_V U_2 \quad (4.1)$$

$$V_{RM} = (1.5 \sim 2) U_{Mf} \quad (4.2)$$

$U_{Mf}$ —整流电路的峰值电压； $U_2$ —变压器的二次侧电压； $K_V=2.34$ （三相桥式）  
整流元件电流等级选择：

可控硅和二极管整流元件的电流等级应选为：

$$I_F > \frac{I}{1.57} \quad (4.3)$$

$I_F$ —元件额定正向平均电流；1.57—正弦半波电流有效值与平均值之比； $I$ —实际流过元件的电流有效值。

基于此原则和安全余量，我们选择正、负脉冲整流电路中的可控硅型号分别为 500A/1200V、100A/800V，二极管型号与可控硅对应相同，续流电阻取值为 1kΩ/500W。

## 2. 斩波器选择

功率开关元件是微弧氧化电源中的一个关键器件。从微弧氧化对电源的要求来看，功率开关元件只能选择全控型器件。全控型器件主要有电力晶体管 GTR、电力场效应晶体管 MOSFET 和绝缘栅极晶体管 IGBT。GTR 是电流型控制器件，由于其对基极控制电路的功率要求十分严格，在实际应用中，常常由于驱动功率、开关时间和开关损耗等问题没有处理好而造成大功率管损坏；MOSFET 具有开关速度快、输入阻抗高、热稳定性好、驱动电路需求功率小等优点，但存在导通电阻大、电流容量低、耐压低等不足，因此不适合作为微弧氧化电源的开关管；IGBT 集 GTR 和 MOSFET 的优点于一体<sup>[59]</sup>。因此，选用 IGBT 作为微弧氧化的功率开关元件。

由于正脉冲电源在微弧氧化中所起的主要作用和我们所要实现的大功率电源的要求，并且考虑斩波器件 IGBT 的性价比，所以采用三块 1200V/1200A 的 IGBT

并联实现正脉冲电源输出 400A 的均值电流。如果考虑电路中的瞬时电流为额定电流的 10 倍，则为 4000A，而 IGBT 在 10ms 内能承受的过电流为其额定电流的 2 倍，则每块 IGBT 在 10ms 内能承受 2400A 的瞬时过电流，再考虑安全余量，决定采用三块此型号的 IGBT 并联使用。

## 4.2.2 保护电路设计

### 1. 主电路中的保护电路

1). 使用快速熔断器对电源进行过电流保护，当电源主电路中电流超过 400A 时，快速熔断器烧损断路，断开电源输入，这是电源第一次的均值电流过流保护。

2). 电源前级输入中每相串联一个  $40\mu\text{FH}/400\text{A}$  的平波电抗器，用来滤除电网中电流波形突变造成的污染，保证设备的输入可靠。

3). 三相 380V 输入中每两相之间并联一个  $22\mu\text{F}/630\text{V}$  的滤波电容和一组 RC 吸收电路（电阻  $5.1\Omega/20\text{W}$ ，电容  $4.7\mu\text{F}/630\text{V}$ ），用来滤除电网中网压波动造成的污染，保证设备的输入可靠。

### 2. 整流电路中的保护电路

为了确保可控硅和二极管的安全工作，采用了 RC 保护。对于 RC 吸收电路：由于电容两端的电压不能突变，所以可以有效地抑制过电压，而串联电阻目的是为了在能量转化过程中能够快速消耗一部分能量。对于二极管的保护与此类似。其中，整流桥中 RC 吸收电路电阻型号分别选择为  $10\Omega/5\text{W}$ ，电容型号选择为  $1\mu\text{F}/630\text{V}$ 。

经分析和试验实测结果表明，微弧氧化系统的负载由工件、阴极极板和二者之间的电解液三者构成，必然导致负载呈现一定的电容性；同时，由于整流桥后级的滤波电容固有的充、放电效应，使得电源关闭后，整流桥承受着一定的反向电压，因此在整流桥后级并联一个吸收电阻与常闭开关组合的放电回路，由控制继电器控制此回路的通断，对此反向电压放电，保护整流桥和整个电源主电路。

### 3. 斩波电路中的保护电路

IGBT 常用于大电流、高电压的场合，因此对其采取保护措施以防器件损坏就显得非常重要。

1). 峰值过电压保护：采用 RCD 吸收电路进行保护，如图 4.2。

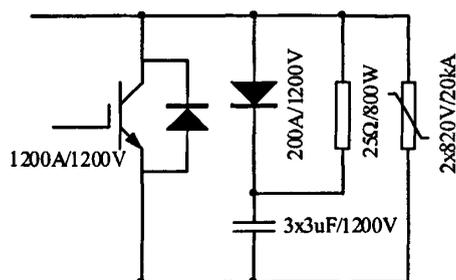


图 4.2 IGBT 的保护电路原理图

当有一个尖峰脉冲电压加载到 IGBT 上时, 由于尖峰脉冲的交流分量很大, 电流通过快速恢复二极管将能量存储在无感电容上, 也就将 IGBT 上的脉冲电压旁路, 从而保护 IGBT 不会因峰值电压过压击穿。之后, 无感电容上的能量将通过电阻消耗, 由于采用快速恢复二极管和无感电容, 因此保证了 RCD 吸收电路的快速性和灵敏性。

2). 峰值过电流保护: 本电源的 IGBT 驱动采用瑞士 SCALE 2SD315A 模块, 此模块自带峰值电流过流保护, 电源的控制系统对保护输出信号进行采集, 当模块输出保护信号时, 控制系统输出保护信号, 同时 P1.1 口输出电平由 +5V 跳变为 0V, 外部继电器线包断路, J 导致接触器线包断路, 切断主电路输入, 实现瞬时过流保护。

3). 均值过电压保护: 如图 4.3 所示, 在每个 IGBT 上并联压敏电阻, 进行 IGBT 的均值过压保护, 原理为: 当压敏电阻器两端所加的电压低于标称额定电压值时, 压敏电阻器的电阻值接近无穷大, 内部几乎无电流流过; 当压敏电阻的两端电压约高于标称额定电压时, 压敏电阻器将迅速击穿导通, 并由高阻状态变为低阻状态, 工作电流也激烈增加, 从而达到保护元器件目的。

4). 均值过电流保护: 如图 4.3, 在电源的采样电路中, 电流采样电路对电流信号进行采样, 数据经由主控板通过串行通讯, 显示在面板上。同时在正、负采样电路上分别设计一个保护电路, 通过一个比较器比较采样所得电流是否过流, 如果过流, 则输出由 +5V 拉低至 0V, 即输出一个均值过流保护信号, 主控板采集到这个保护信号后, P1.1 口输出电平由 +5V 跳变为 0V, 导致接触器线包断路, 切断主电路输入, 实现均值过流保护。



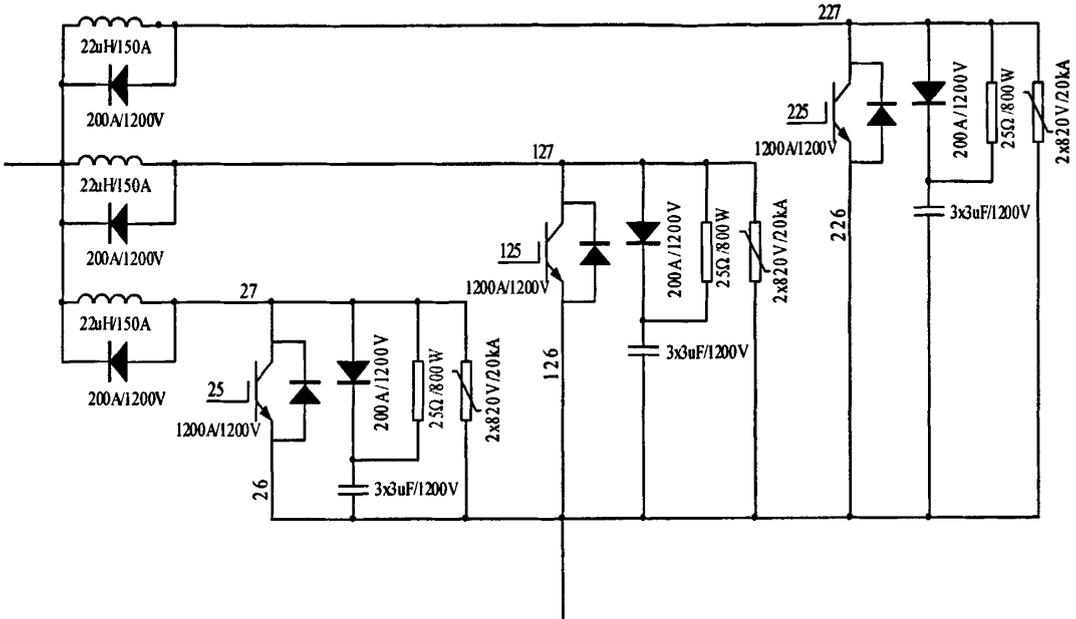


图 4.4 IGBT 并联方式图

## 4.3 控制电路设计

### 4.3.1 控制电路设计要求

本电源是本课题组在多年从事大功率电源和微弧氧化技术研究的基础上，开发的新一代大容量表面处理装置，主要用于铝、镁合金零部件生产过程中表面微弧氧化处理。本设备采用国际知名品牌的功率电子器件及 16 位单片计算机数字控制，具有功率大、效率高、性能稳定、工作可靠、操作方便等特点。总体来说，它应具有下述功能：

- 1、输脉冲频率在 100-900Hz 连续可调，占空比在 10~90%连续可调。精确的恒流与恒压输出特性，控制精度分别在 $\pm 0.5V$  和 $\pm 0.5A$  以内。
- 2、支持程控和手动两种工作模式。
- 3、全数字化的显示和操作界面，方便易用。
- 4、完善的故障自检、报警和保护功能，防止误操作引起设备损坏。对微弧氧化过程可能出现的各种故障进行检测，一旦有故障发生，及时诊断与处理，保障电源的安全与微弧氧化过程的顺利进行。

控制电路研究主要考虑以下要求：1、系统功能丰富。既要有功能齐全的单片计算机，又要有高速可靠的输入、输出接口电路和参数预置显示功能。2、实时性好。基于三相半控整流电路的微弧氧化电源开关频率较高，控制系统要保证有高速的数字处理功能、A/D、D/A 转换速度，还要有高性能的控制软件。3、友好的人机

界面。工艺参数的预置简单方便，微弧氧化过程中实时显示电流、电压，并具有故障显示功能。4、抗干扰能力强。由于电源使用环境恶劣，特别是网压波动较大的影响，因此控制系统必须有较强的可靠性与抗干扰对策。

控制电路由主控电路、工艺参数预置和显示电路、SCR 触发电路、IGBT 驱动电路、数据采集电路、故障保护控制电路等组成。

### 4.3.2 控制系统组成

为了更好提高控制系统的实时性、运算能力和控制精度，选用 Intel 公司生产的 MCS96 系列 16 位高性能的 80C196KB 为核心构成主电源控制系统。单片机 80C196KB 采用 CHMOS 工艺制造，具有运算速度快、处理能力强、接口丰富的特点；集成有 8 字节的 EPROM；232 字节寄存器阵列；20 个中断源；脉宽调制(PWM) 输出；4 个高速输入口 HIS、6 个高速输出口 HSO；4 个 16 位软件定时器及 16 位具有捕俘功能的可逆计数器、采样——保持的 10 位 A/D 转换器，全双工串行口，看门狗以及高速时钟和高速 I/O 输出口等<sup>[60]</sup>。

本电源主控板电气原理如图 4.5 所示。控制器核心为 Intel16 位 80C196KB 单片机，其片内 10 位 A/D 转换器扩展了 4 通道采样电路，用于实时采样电源的输出电压及输出电流，并通过两个电位器读入预置的微弧氧化电压和电流设定值，电压、电流分辨率分别为 0.1V 和 0.1A。系统采用 8 位外部总线，扩展 16k 字节的程序存储器 27C64、并行接口 8255、以及 16 位计数器/定时器 82C54。其中 82C54 与同步电路、触发电路等构成同步触发脉冲产生电路，为微弧氧化电源晶闸管提供触发脉冲，控制电源外特性。同时通过单片机的 P4.6、P4.7 扩展一片 74HC139，作为片选信号，分别用来选通 27C64、82C54 及 8255。由于 80C196KB 单片机采用地址/数据分时复用技术，低 8 位地址线 A0~A7 与数据总线 D0~D7 分时使用 P0 口，因此在存储器低 8 位地址之间加一片地址锁存器 74LS373 将地址信号从地址/数据总线中分离出来，当 74LS373 用作地址锁存器时，首先使三态门的使能信号 OE 为低电平，此时，当 74LS373 的 11 脚 LE 输入端为高电平时，锁存器输出状态和输入状态相同。当 LE 从高电平返回到低电平时，输出端的数据锁入 74LS373 内部的 8 位锁存器中。在本课题中将单片机的 ALE 端与 74LS373 锁存控制端相连，在 ALE 下降沿时进行地址锁存。

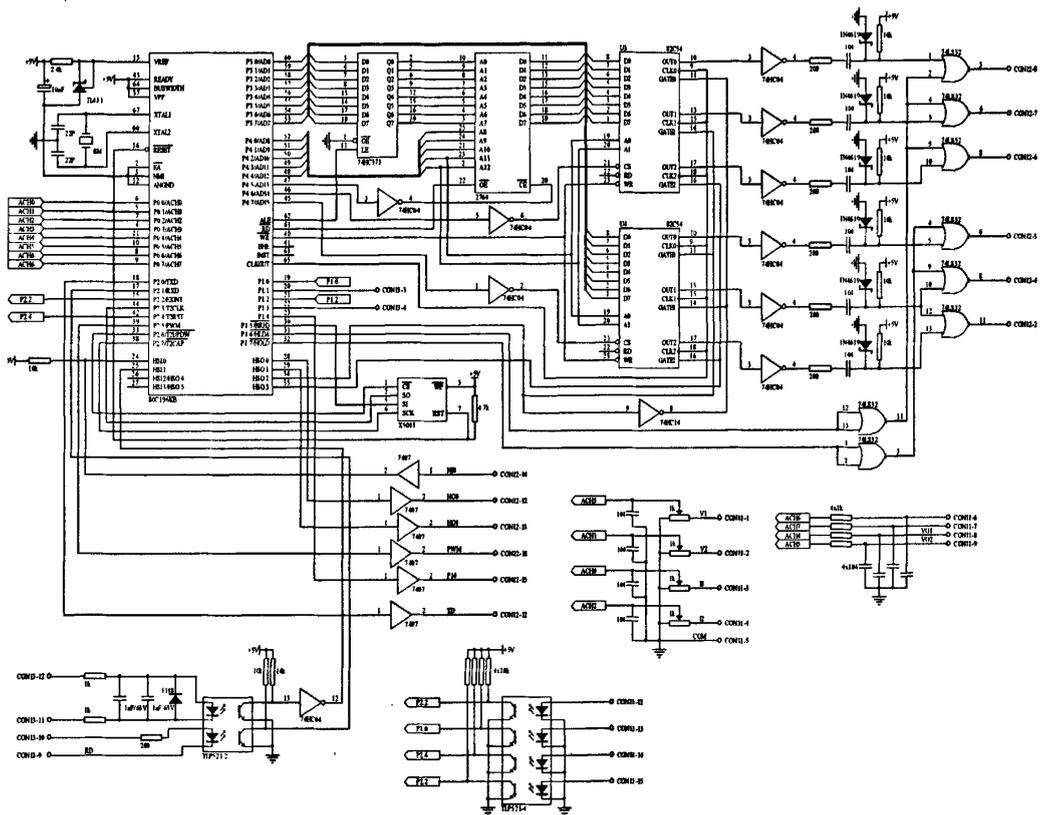


图 4.5 主控电路原理图

在电源控制系统中，82C54 为具有 3 个独立通道的 16 位可编程计数器/定时器集成电路芯片，有 6 种工作方式，每个通道提供独立的时钟输入 CLK、门控信号 GATE、输出信号 OUT。该控制器关键部分是 82C54 与 80C196KB 的高速输入/输出 HSI、高速输出 HSO 以及定时器 T<sub>2</sub> 一起构成同步数字触发器，用于产生整流器晶闸管的另一路同步触发脉冲，从而与计数器/定时器 82C54 构成三路触发脉冲，实现微弧氧化电源主电路的控制。其工作原理为：82C54 的计数器 0 工作于方式 3 即方波发生器方式，计数脉冲 CLK<sub>0</sub> 来自单片机的时钟输出 CLKOUT (4MHz)，当装入的计数值 N 为偶数且 GATE<sub>0</sub> 为高电平时，OUT<sub>0</sub> 端输出对称方波，作为计数器 1、2 以及单片机 T<sub>2</sub> 的计数时钟。计数器 1、2 工作于硬件触发单拍脉冲输出方式（即方式 5），在 GATE 的上升沿之后开始对预先写入的时间常数 N 作减 1 计数，每个 CLK 上跳沿使 N 减 1，计数器回零时其 OUT 端将输出一个低电平脉冲，若接在 GATE 端信号的正跳变对应于晶闸管自然换相点，则输出脉冲经功率放大即可作为晶闸管的同步触发脉冲。系统时钟采用 8MHz，CLKOUT 时钟频率为 4MHz，故晶闸管控制角为  $t_0 \times t_1 \times 0.25\mu s$ ，其中  $t_0$  为写入计数器 0 的时间常数， $t_1$  为计数器 1 或 2 的时间常数。由于级联计数器中各计数器的工作周期 ( $t_0$  或  $t_1$  的最大值) 小于单个计数器 ( $t_0 \times t_1$  的最大值)，而控制角调节周期必须大于其工

作周期。因此，采用级联计数器进行相位定时，可以大幅增加调节频率，从而提高系统的动态响应。电源动特性正是通过这种方法来保证。

由于单片机 80C196KB 的定时器 2 不仅可用作可逆计数器、附加计数器，而且还可以用作 HSO 单元的外部基准、外部事件的捕获等。因此，利用 80C196KB 的高速输入、输出口及定时器 2，从而获得第 3 路触发脉冲，原理为：用 82C54 的 OUT0 作 T2 的计数脉冲，从而保证计数脉冲的一致性，HSO.3 以 T2 为时钟源，HSO.2 所产生的同步脉冲作 T2 的复位源，通过 HSO 命令即可使 HSO.3 模拟 82C54 的工作方式，在 HSO.3 脚得到触发脉冲。

设计的电源控制系统中，不仅包括硬件同步、而且还包括软件同步的设计。硬件同步是指 82C54 门控信号 GATE1、GATE2 和单片机 T2 复位信号，必须是晶闸管自然换相点时刻的脉冲信号才能获得同步触发脉冲。设计采用所谓软件同步方案，即每个工频周期由光电耦合器检出一个电网电压过零点作为同步基准，用 80C196KB 的 HSI.0 基于 T0 捕捉其到达时刻，并以此基准用软件通过 HSO 命令，在 HSO.0~HSO.2 上产生同步脉冲序列，使脉冲上跳变与整流器晶闸管自然换相点保持一致<sup>[61]</sup>。软件同步一方面解决了不同主电路形式对触发脉冲不同的要求，同时能提高可靠性，降低控制器的硬件开销及提高了硬件系统抗干扰能力。这种同步方法对主变压器、晶闸管和三相电源有一定对称性要求，通常情况下均能满足。若适当减小移相范围，增加脉冲宽度，可提高不对称情况下的适应性。

### 4.3.3 控制系统硬件设计

#### 1. SCR 触发电路设计

主控电路中的可控硅触发脉冲产生之后需要足够的驱动电流，同时必须与电源主电路相隔离，才能正确的触发对应的可控硅，所以必须设计一个可控硅触发电路，将触发脉冲放大并与电源主电路隔离。如图 4.6 所示：触发脉冲经光电耦合器隔离，驱动信号经三极管 TIP122 放大，再通过脉冲变压器放大，通过滤波电路加载到可控硅的门极与发射极之间，实现可控硅的触发。

触发电路中的+12V 电源由控制变压器后级电压经整流和滤波后提供。发光二极管用来指示触发电路的工作状态。

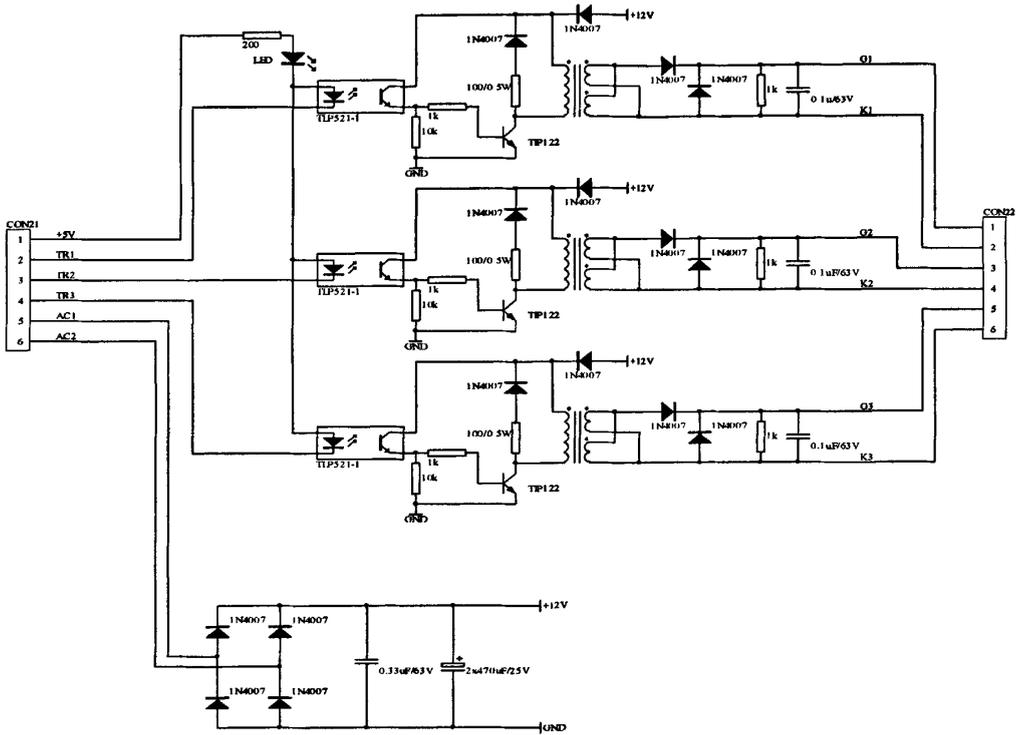


图 4.6 SCR 触发电路原理图

## 2. IGBT 驱动电路设计

本电源 IGBT 驱动电路模块选用瑞士 CONCEPT 公司的 2SD315A 集成驱动模块，2SD315A 集成驱动模块采用单电源供+15V 电，适合于驱动 1700A/1200V 的大功率 IGBT，其特点为：工作模式可自由选择(半桥模式和直接模式)；控制逻辑电平可选择(TTL 电平和+15V 电平)；可选模式的信号输入与状态输出；具有短路和过电流保护功能；具有智能型欠电压监测功能<sup>[61]</sup>。

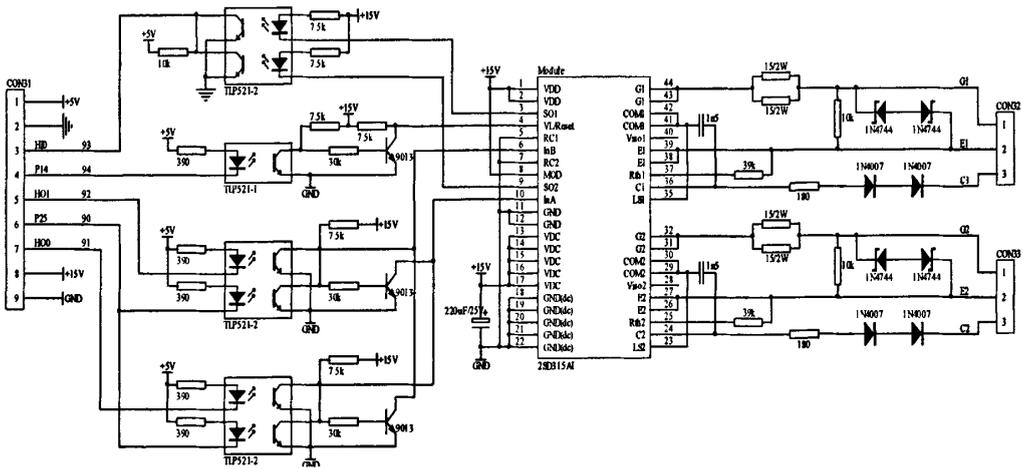


图 4.7 IGBT 驱动电路原理图

2SD315A 集成驱动模块的外围电路如图 4.7 所示：由单片机高速输出口产生的 IGBT 驱动信号经过光耦隔离，输入 2SD315A 模块，保证控制信号与驱动信号的隔离。在 IGBT 的栅极和发射极之间，反向并联两个 15V 的稳压管，保证 IGBT 栅极驱动电压在开通时为+15V，关断时强制拉低至-15V。

该驱动模块的模式选择端 MOD 外接+15V 电源，输入引脚 RC1 和 RC2 接地，为直接工作模式。逻辑控制电平采用+15V，信号输入管脚 InA、InB 连接在一起接收来自单片机的脉冲信号，进行同步控制。2SD315A 的 SO1 和 SO2 两只管脚用来输出两输出模块的工作状态，其输出端结构皆为集电极开路输出，可以通过外接上拉电阻以适用于各种电平逻辑。正常工作时，SO1 和 SO2 输出皆为高电平，当检测到故障信号时，其输出电平被拉低到地。

### 3. 采样电路

由于本电源功率很大，因此对电流和电压信号的采样就成为了一个难点，为了保证采样的准确性和显示的精度，并且考虑到电源的研制成本，设计如下的采样电路，如上文图中图 4.3。

采样电路采用四个霍尔电压传感器进行电流和电压的采集：电源正、负半周的电压信号通过两个霍尔电压传感器进行直接采集，输出信号直接输入单片机进行数据处理和显示；电源正、负半周的电流信号分别取自于两个分流器的两端的电压信号，经过放大和电压、电流信号转换，变换为电压信号通过霍尔电压传感器进行采集，输出信号直接输入单片机进行数据处理和显示。

电源正、负半周过流保护则是通过将采集的电流信号经过放大器和比较器进行处理，如果过流，则通过光耦隔离将一个过流保护信号直接传输至单片机的 ACH6 或 ACH7 口线中，单片机随之进行过流保护，这样的方式，保证了过流保护的及时性和可靠性。

采样板有独立的电源，即将控制变压器三线双~18V 电源引入，将三线双~18V 的公共端作为参考地，其余两线经过一个单相整流桥整流，经过电容平滑滤波后分别进入三端稳压器 7815 和 7915，后级再次经过电容滤波后分别输出直流电压 +15V 和 -15V，作为霍尔电压传感器的工作电源。

### 4. 串行通讯接口和故障保护显示

微弧氧化脉冲电源与人机界面系统电路之间通过串行通讯交换数据。考虑到抗干扰能力和系统实时显示的要求，采用光电耦合器 TLP521 设计 20mA 电流环异步串行通讯接口，通讯波特率为 1200bps，并进行奇偶校验与求和校验，原理如图 4.8 所示。在微弧氧化过程中，人机界面系统向电源发送给定电压或电流、脉冲频率、占空比以及脉冲个数等命令；同时从电源接受输出电压、电流等信息，根据特性自动选择调节方式。系统上电时如通讯测试失败，或者电源在工作时出现各种保护时，电源在停止工作的同时，将显示出故障信息。

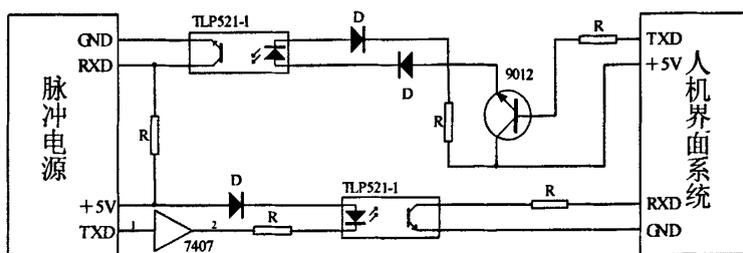


图 4.8 串行通讯接口电路

### 4.3.4 抗干扰措施

由于微弧氧化电源中电感、电容等储能元件及开关器件较多，当电压、电流发生剧烈变化时就会形成瞬间噪声干扰，对电子器件危害性大；在本课题中控制系统的核心是单片机 80C196KB，由于其构造体系的限制，极易受干扰的侵害。因此单片机的可靠工作就成为整个控制系统的关键因素之一。

#### 1. 总线的可靠性设计

通过在总线上适当安装上拉电阻可以提高总线信号传输的可靠性。一方面，它可以提高信号的电平，由此提高集成电路输入信号的噪声容限。以单片机 P0 口为例，当不加上拉电阻时，P0 口输出电流为  $I$ ，端口的高电平  $U = V_{cc} - IR$ 。当加上拉电阻后，P0 口输出电流变为  $I_1$ ，由于负载恒定，则  $I_1 < I$ ，因此端口电平  $U = V_{cc} - I_1 R$ ， $U$  将要有所提高。另一方面，当总线处于高阻状态时是处于悬空状态，比较容易接收外界的电磁干扰，干扰信号通过数据总线进入 CPU，引入虚假的程序指令，当数据总线上配有上拉电阻，总线具有稳定的高电平，此时指令仅为“FF”，相当于“MOV R7, A”指令，比总线上出现的随机指令所造成的后果要好得多。还有就是总线上配置上拉电阻，降低了芯片的输入阻抗，为静电感应电荷提供泄荷通路，使其免受静电损坏。

#### 2. 芯片配置与抗干扰

数字电路除了地线阻抗问题外还存在电源线的阻抗问题。当数字电路受高速跳变电流作用时，将产生阻抗噪声。解决此问题的有效措施是设置合适的去耦电容。去耦电容直接跨接在要去耦的电源和地之间，每一块集成电路芯片上都配置一个，以便随时充放电，电容的大小根据晶振的大小选择，当晶振低于或等于 6MHz 时，去耦电容选用 0.1 $\mu$ F，当晶振为 12MHz 时，去耦电容选用 0.01 $\mu$ F。

#### 3. 时钟电路配置

时钟电路产生 CPU 的工作时序脉冲，是 CPU 正常工作的关键部件。很多干扰归根结底是破坏了时钟的正常运行，从而导致 CPU 工作失控。为了避免时钟信号被干扰，本系统采取了以下措施：

1、时钟脉冲电路配置时靠近 CPU，引线短而粗。

2、外部时钟源用的芯片的  $V_{cc}$  与 GND 之间接  $10\mu\text{F}$  的去耦电容。

3、设计印制板电路时用地线包围振荡电路，晶体振荡器外壳接地镇定。

#### 4. 复位电路设计

任何单片机都是通过可靠复位之后才可有序执行应用程序。同时复位电路也容易受噪声干扰的敏感部位之一。因此，复位电路设计要求：其一，要保证整个系统可靠复位，其二，要有一定的抗干扰能力。本系统中采用集成的 WDT 和电源监控芯片 X5043 作为整个系统的复位源，确保系统的正常稳定运行。

#### 5. RAM 数据掉电保护

微机在上电及断电过程中，总线状态的不确定性往往导致 RAM 内某些数据的变化。因此，对于断电保护数据用的 RAM 存储器，除了配置供电切换电路外，还要采取数据防冲失措施。本系统中的所有的系统参数都保存在 EEPROM 芯片 X5043 中不会丢失数据。

### 4.4 本章小结

本章主要阐述了针对微弧氧化工艺对电源的要求，设计具有放电回路的微弧氧化脉冲电源的主电路及以 80C196KB 单片机为核心的电源控制系统和显示控制系统。主要包括电源和过程控制系统、SCR 触发电路、IGBT 驱动和保护电路、采样和保护电路等。

本电源的设计特色主要有：

1、使用三相半控桥式整流电路作为电源整流电路，既满足电源要求又节省了可控硅的个数，提高了可控硅触发的可靠性。

2、设计 IGBT 并联结构实现了电源大功率输出，降低设备的制造成本。并且主要使用均流电抗器对并联多 IGBT 进行过流保护和实现均流。

3、设计以 80C196KB 单片机为核心的电源控制系统及以单片机 AT89C52 为核心的电源参数预置与显示控制系统，二者通过串行通讯进行数据交互，实现了友好的人机界面和高速可靠的控制系统。

4、合理和高效使用了 80C196KB 单片机的各种口线，尤其是高速口，实现同步信号、故障保护信号的采集、IGBT 的驱动信号的产生。

## 第 5 章 控制系统软件设计

本文设计的带放电回路的微弧氧化电源具有恒压、恒流两种输出特性，并且能够实现手动控制和最多四个阶段的程控，满足不同微弧氧化工艺的要求。在软件设计中，包括微弧氧化的电源控制、微弧氧化的过程控制、故障检测保护及与上位机的通讯功能。要实现这些功能，控制系统软件结构必须合理，设计的程序可靠性高、功能强、可维护性好，这也是控制系统软件的基本原则。

在微弧氧化过程中更新显示电压、电流是微弧氧化电源必需的基本功能。本系统 1s 进行一次显示更新，采样周期 250 $\mu$ s，采样周期中调用 PI 控制，从而既能保证系统控制的精度又能实现微弧氧化参数的实时显示。当工作在脱机方式下，通过 LED 显示器来显示脉冲参数、电压、电流及处理时间等参数。

### 5.1 参数预置和操作流程

如图 5.1 所示，操作中电源各个开关的吸合顺序由单片机进行控制，只有当自检程序通过后才允许主电路中接触器吸合，也就是通过弱电控制强电保证了电源的可靠性和安全性。人机界面上通过 8 个轻触按键和 2 个旋钮的组合使用，能精确设置电源的工作方式和电参数设定，并且在电源工作的开始和停止操作时需要二次确认，防止误操作对电源和微弧氧化工艺的损害，并且支持电源工作的暂停和继续。

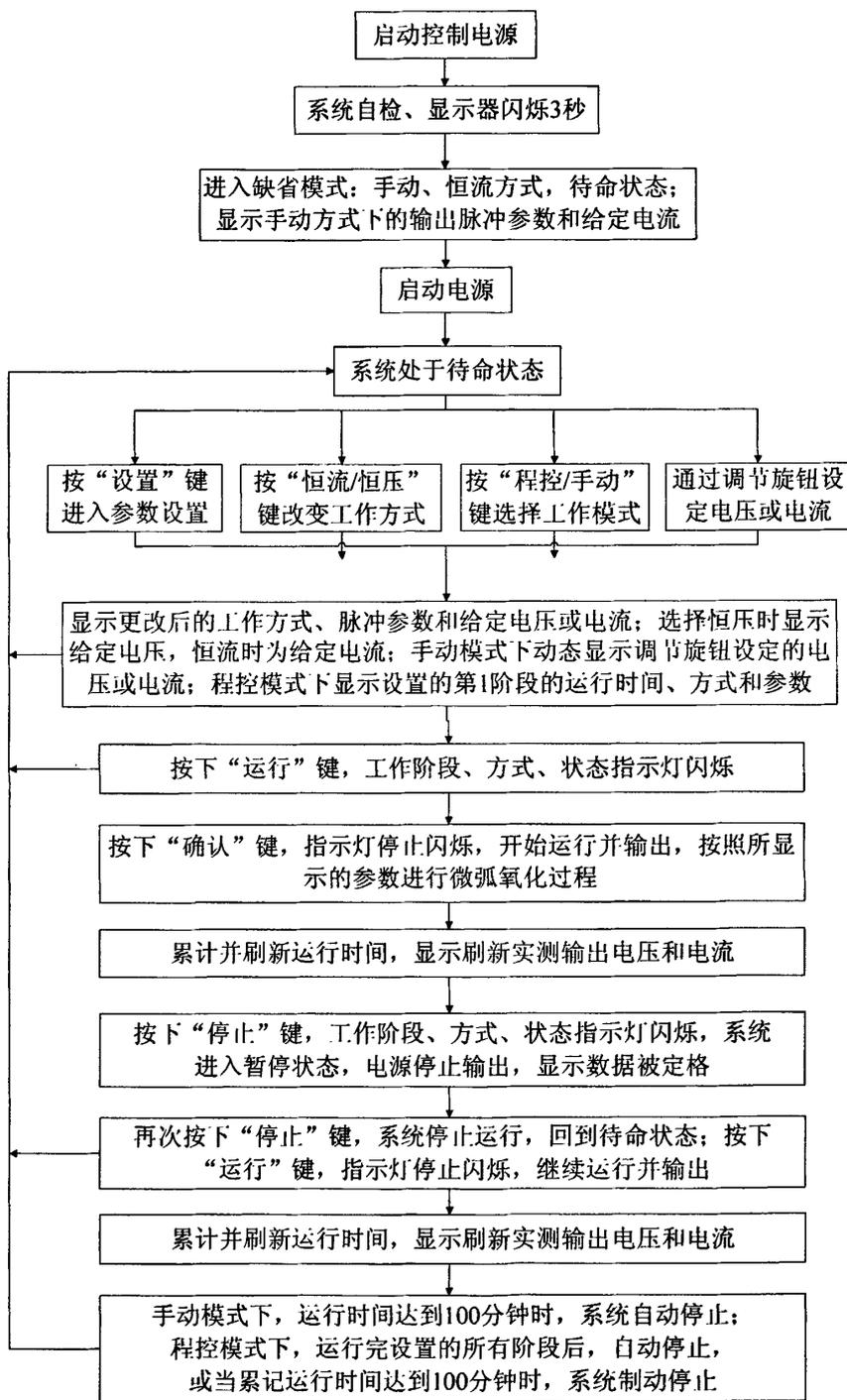


图 5.1 操作主流程图

### 1. 手动模式参数设置

手动模式下，仅设置输出脉冲参数（频率、占空比、正脉冲数、负脉冲数），输出正、负脉冲的电流或电压均通过调节旋钮动态调节。操作流程图如图 5.2：

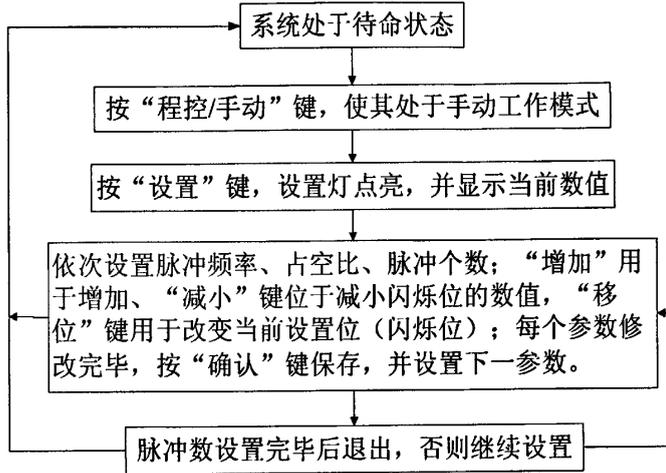


图 5.2 手动模式参数设置流程图

## 2. 程控模式参数设置

设计的微弧氧化电源可以根据实际需要选择电源输出的特性，即恒压或者恒流，而二者各自需要预置的参数不尽相同，故预置参数与外特性键配合进行预置。用单片机的两个端口 P0.6、P0.7 进行检测需要的输出特性，即 P0.6、P0.7 为 00 时，需要输出恒流特性；P0.6、P0.7 为 01 时，输出恒压特性。

如图 5.3，程控模式下，须对所需每个阶段的恒流/恒压方式、输出脉冲参数、电流或电压进行设置。最多可设置 4 个阶段，当某阶段运行时间设为 0、或第 4 阶段设置完毕后退出。

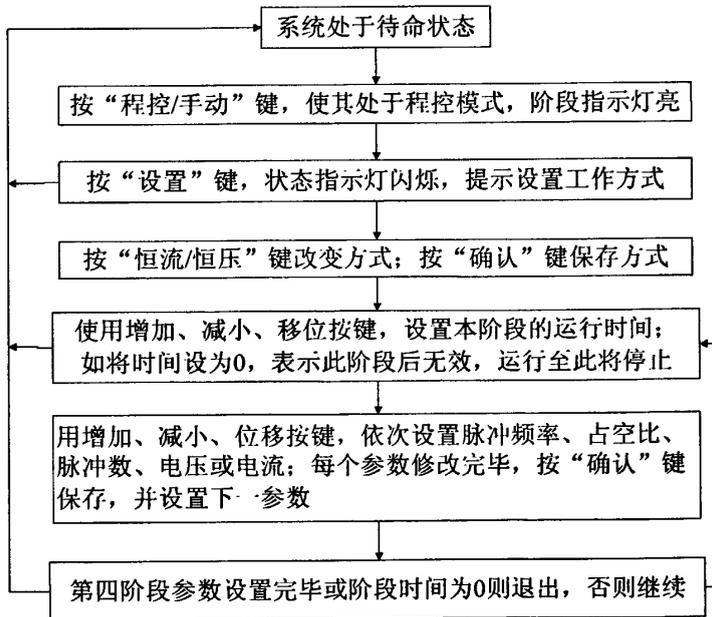


图 5.3 程控模式参数设置流程图

## 5.2 过程控制流程

将微弧氧化最多划分为 4 个过程，采用模块化方法设计控制软件。过程控制流程如图 5.4 所示。

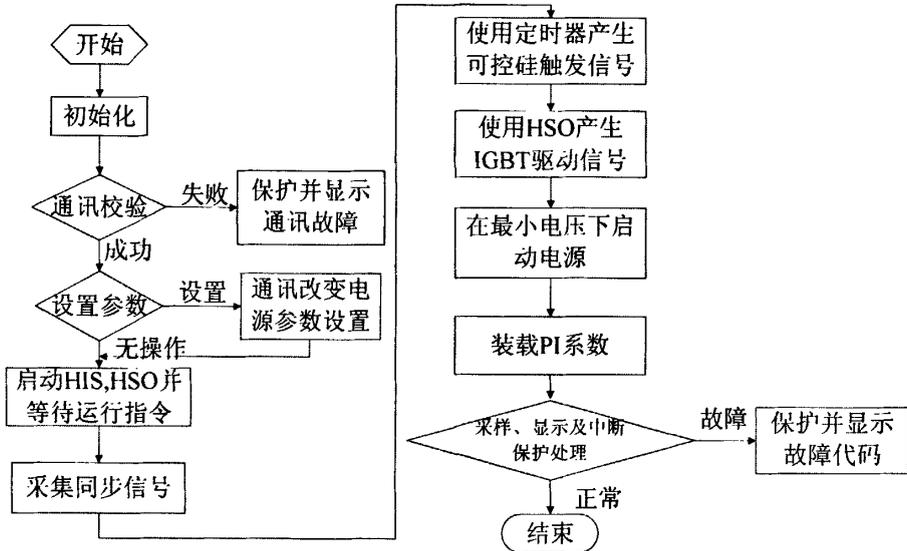


图 5.4 过程控制流程图

微弧氧化过程中，电源控制系统初始化后自检，进行通讯校验，如果校验失败则电源自动故障保护，并显示通讯故障，保证电源的安全性。通讯校验成功以后，根据用户对人机界面的操作进行电源参数的修改或按照上次运行的方式和参数继续运行。电源运行以后，根据用户设置进行手动模式、恒流或恒压这三种工作方式的运行。在手动模式下，电源的输出特性为自然特性，脉冲电压的幅值由人机界面上两个旋钮分别控制；在自动模式下，通过 PI 调节进行恒流或恒压输出。在运行过程中，采样系统在采集电参数信号的同时进行各种保护信号的输出，如果主控板接收到保护信号，控制系统将瞬时切断主电路输入，同时显示相应的故障代码，以此达到保护电源的目的。

## 5.3 电源控制软件设计

### 5.3.1 控制原理

当负载波动时，电源应该能够及时调节跟随，维持电流或电压稳定。在这一点上，数字反馈较之于模拟反馈存在劣势，数字反馈的速度主要受限于 A/D 采样速度和调节算法的耗时。对于微弧氧化过程而言，其负载特性较为复杂，既不是纯容性负载，也非纯阻性负载，而是两者兼而有之的一个分布性负载，同时，随着氧化过程的进行膜厚逐渐增加，负载也在逐渐变化，考虑到负载波动是一个缓慢变化的过程，因此，用单片机数字调节能够满足控制要求。从控制理论上分析，

PI 调节是可以综合快速型和稳态无差性的调节方法。同时，软件算法应着重考虑的是解决局部小范围精确快速调整，优化软件结构，减少代码量，降低耗 CPU 时间。因此，在本系统硬件条件下，采用 PI 控制算法较为适合。

### 5.3.2 调节算法

根据微弧氧化过程中工艺要求，主要针对程控模式下，电源按照 4 个阶段自动工作，设计了恒流和恒压 2 种电源特性。采用数字 PI 调节器控制，分别为电压反馈和电流反馈。PI 算法表达式为：

$$u_{(n)} = u_{(n-1)} + K_p [e_{(n)} - e_{(n-1)}] + K_p \frac{T}{T_i} e_{(n)} \quad (5.1)$$

$u_{(n)}$  为 PI 调节器本次计算的输出， $u_{(n-1)}$  为上一次的输出， $K_p$  为调节器的比例系数，即调节器的增益， $T$  为采样周期，即两次调节的间隔， $T_i$  为积分时间， $e_{(n)}$  为被控对象的目标值与采样值的偏差， $e_{(n-1)}$  为上次采样的偏差。

恒流特性时偏差取给定微弧氧化电流  $I_g$  与采样的输出电流  $i_{o(n)}$  之差；恒压控制时偏差为给定电压  $U_g$  与输出电压  $u_{o(n)}$  之差。

$$u_{o(n)} = u [i_{o(n)} - I_g] + U_g \quad (5.2)$$

对于电流反馈，偏差：

$$e_{(n)} = \frac{1}{\mu} [u_{o(n)} - U_g] + I_g - i_{o(n)} \quad (5.3)$$

对于电压反馈，偏差：

$$e_{(n)} = \mu [i_{o(n)} - I_g] + U_g - u_{o(n)} \quad (5.4)$$

采样周期为 0.2ms，积分时间 20~30ms，比例系数根据输出静特性、反馈形式、并按控制角分段整定，取值范围 0.01~2.0。

## 5.4 计算机控制程序

计算机控制程序实现电源与上位机的通讯，其程序流程图如图 5.5：

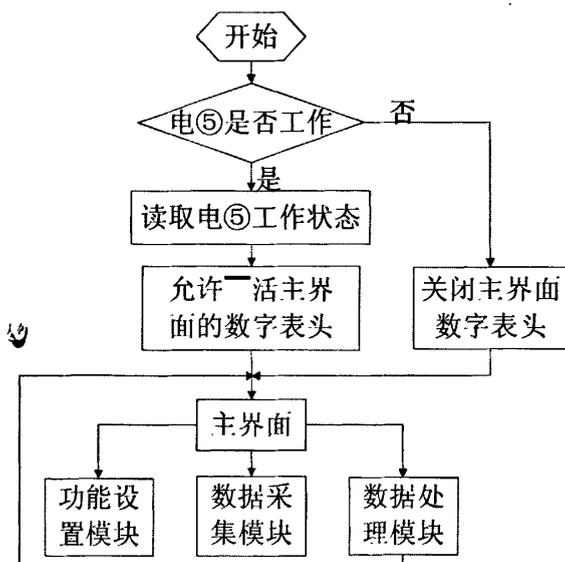


图 5.5 通讯程序流程图

## 5.5 本章小结

1 采用模块化的设计思想，针对微弧氧化设备工作过程，设计了操作主程序，手动、程控模式参数设置程序，过程控制程序和串行通讯程序。

2 采用数字 PI 算法可实现恒流、恒压两种电源外特性。对于恒压电源静特性，通过电压反馈 PI 调节器进行恒压输出；恒流静特性，采用电流反馈的 PI 调节器确定横流输出，由此构成双 PI 调节器的微弧氧化电参数调节系统，获得满意效果。

## 第 6 章 电源调试

### 6.1 离线调试

将控制电路连接好，暂不与主电路连接，进行离线调试。这样主要是因为三相半空桥中的可控硅触发是有顺序的，如果触发顺序错误，则相当于电源缺相，造成整流桥后级输出电压低于设计电压，同时主电路的拓扑结构是 IGBT 串联结构，如果 IGBT 出现误通，就会造成电源之间的短路。

#### 6.1.1 SCR 触发电路离线调试

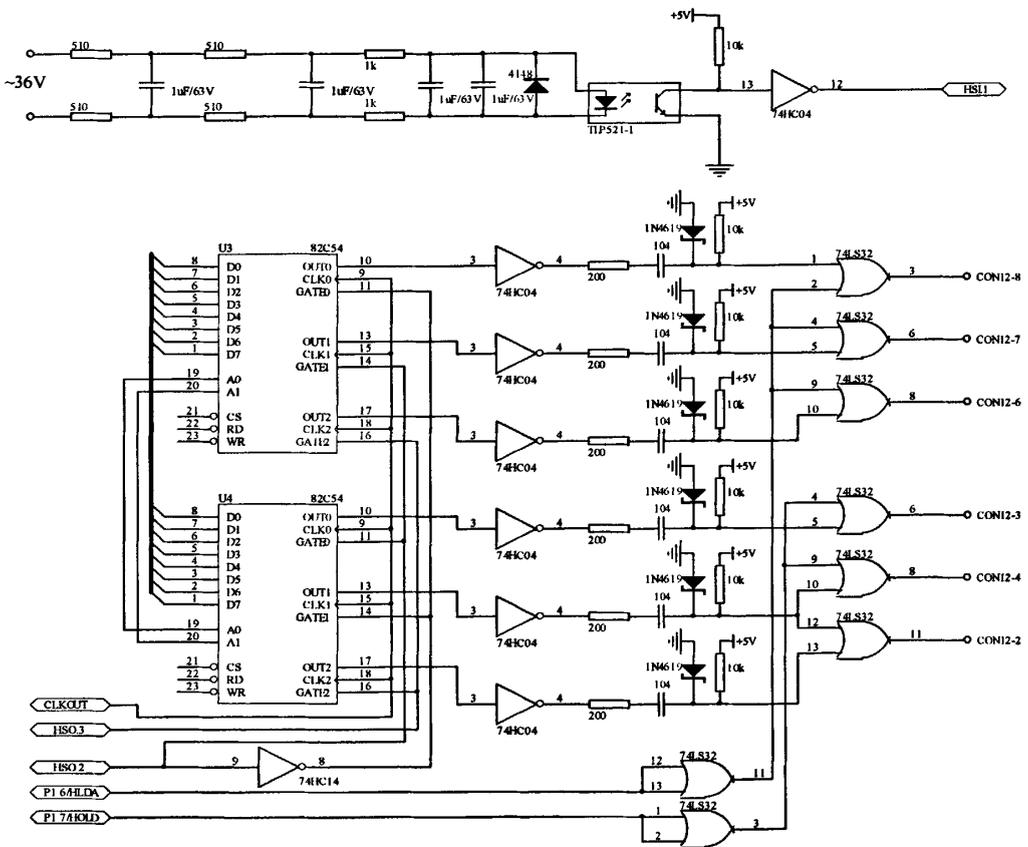


图 6.1 同步及触发电路原理图

使用控制变压器后级 36V 抽头作为同步电路的输入，用示波器采集 HIS.1 上的波形，采集到的波形如图 6.2。

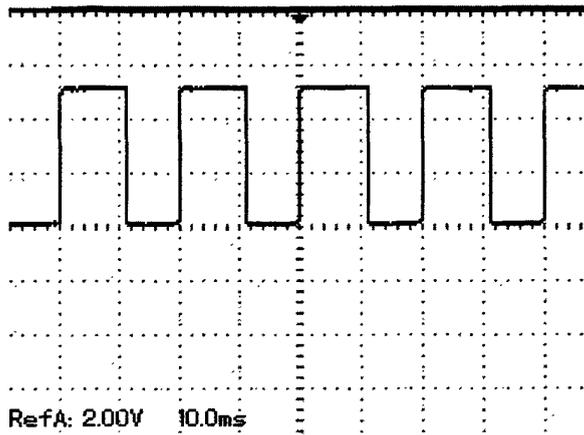


图 6.2 同步电路输出信号波形图

由此图可以看到，同步脉冲的周期为 20ms，与工频交流电相符，逻辑电平的高低与设计相符。因为光电耦合器中发光二极管有管压降，同步电路中两相电压的压差必须高于这个管压降，光耦才能工作，所以，同步电路中低电平持续时间应该略长，而在 HIS.1 口之前用一个反相器反相，故其中高电平持续时间略长。这个时间差已经在软件上扣除。

分别用示波器采集 6 个可控硅触发信号波形，如图 6.3 所示。

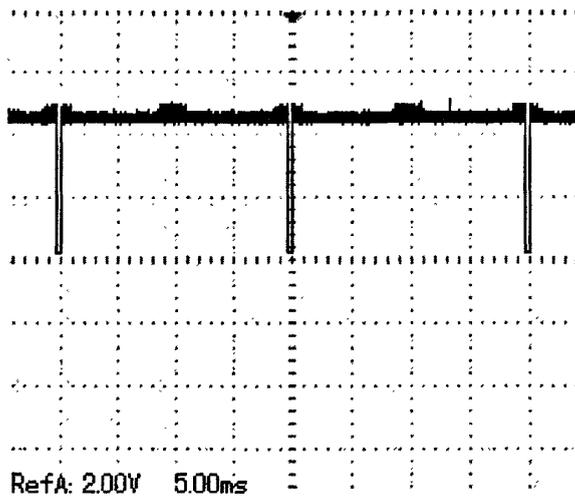


图 6.3 可控硅触发信号波形图

由图可以得到，每个可控硅的每个触发脉冲之间的时间间隔为 20ms，换算为工频 50Hz 下的角度为  $360^\circ$ ，每个三相半控桥的三个可控硅触发脉冲通过软件对定时器进行定时产生，依次相差  $120^\circ$  发生触发脉冲。因此，定时器产生的可控硅触发脉冲与设计相符。

## 6.1.2 IGBT 驱动电路离线调试

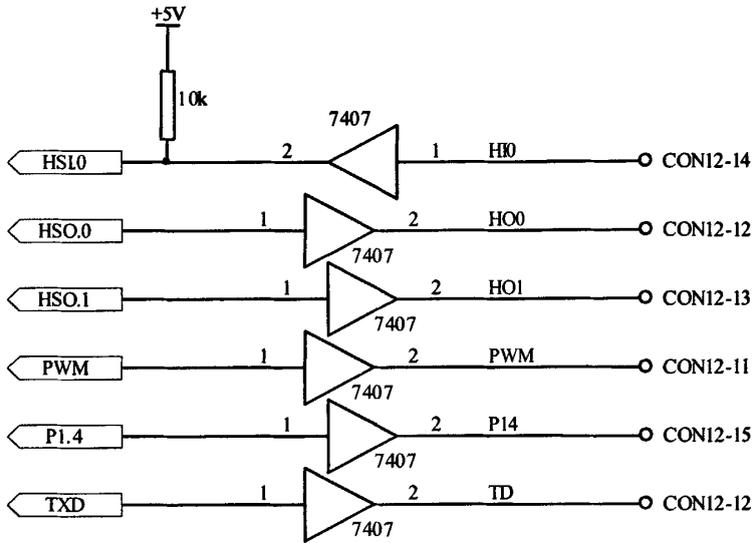


图 6.4 IGBT 驱动脉冲发生电路原理图

本课题设计的 IGBT 驱动脉冲发生电路如图 6.4 所示：由单片机高速输出口 HSO.0 和 HSO.1 分别发生对应正脉冲和放电回路的驱动脉冲信号，传入 IGBT 驱动电路；PWM 信号由单片机 PWM 口输出

在人机界面上将电源输出脉冲参数设为：频率 500Hz，占空比 30%，正脉冲数 1，负脉冲数 0。用示波器采集单片机高速输出口 HSI.0 输出波形，如图 6.5。

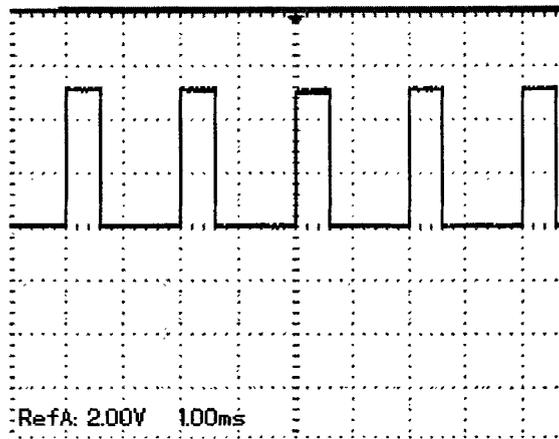


图 6.5 HSO.0 口产生的 IGBT 驱动波形图

在此参数下，电源输出为直流脉冲输出，脉冲周期为 2ms，由图可知，HSO.0 口产生的正半周 IGBT 驱动与设计相符。

## 6.2 上电调试

### 6.2.1 主电路上电顺序调试

将电源输入端与三相工频交流电源连接，三相 380V 工频交流电压经快速熔断器输入设备，电源指示灯亮，散热风扇启动。当按下常开开关 AN1 时，控制变压器工作，输出三路分别为 220V、36V 和 12V 的交流控制电压，其中，220V 作为开关电源的供电，并且通过一个 220V 变双 18V 的变压器为采样板电源供电；36V 用于为交流继电器供电和同步电路的输入；12V 用于为 SCR 触发板的电源供电。控制系统在开关电源工作后进行自检，如果自检正常，P1.1 口输出为高，继电器板上固体继电器吸合，JZ3 吸合，主回路接触器 JC1 吸合，主回路接通，同时，JZ2 吸合，常闭触点 JZ2-1 和 JZ2-2 断开，放电回路断开，电源可以正常工作。

人为制造故障，检测主电路上电是否正常。如将人机界面与单片机之间的串行通讯线路断开，则自检失败，人机界面显示 E-09，为通讯故障，P1.1 口输出为低，固体继电器不动作，主电路不工作。

### 6.2.2 整流电路调试

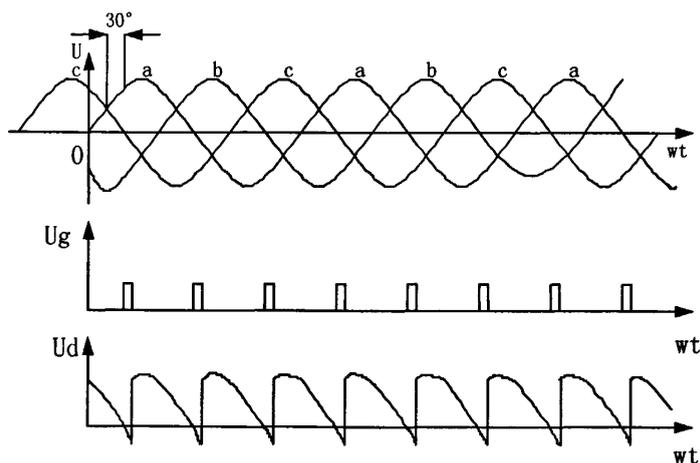


图 6.6 三相半控桥式整流电路  $\alpha=30^\circ$  时的波形

如图 6.6，为三相半控桥式整流电路中控制角  $\alpha=30^\circ$  时的波形，本电源中也即此原理，但由于后级并联滤波电容，因此整流电路输出平滑，人机界面上显示的是平均电压。根据设计要求，调节程序中可控硅的控制角移相范围，根据实测调整，控制角移相范围为  $30^\circ\sim 200^\circ$ 。

### 6.2.3 斩波电路调试

#### 1. IGBT 驱动电路输出调试

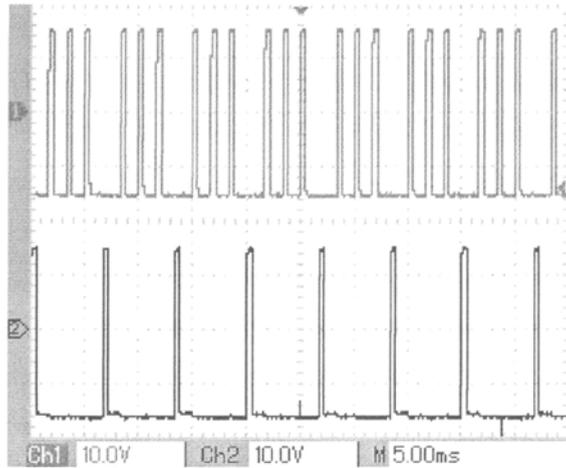


图 6.7 IGBT 驱动板输出波形 (600Hz,30%)

图 6.7 为电源参数设置为频率 600Hz，占空比 30% 时 IGBT 驱动板后级输出波形。由图可以得到：IGBT 驱动电压为 +15V，强制关断电压为 -15V；正脉冲和放电回路的 IGBT 驱动配置正确且不会同时开通。

#### 2. 电源输出调试



图 6.8 负载时电源输出波形 (600Hz,30%,1:1)

图 6.8 为电源参数设置为频率 600Hz，占空比 30% 时电源空载输出波形。由图可以得到：当电源负载时，正脉冲过后放电回路直接把电压拉到零位，但是由于预留了 20 $\mu$ s 宽度的时间来保证前面一个 IGBT 能完全关断，因此从波形上来看电压下降为零有一个较陡的斜线。

### 6.3 本章小结

本章详细说明了离线调试控制电路和在空在下联机调试电源的步骤，并给出了调试过程中相关波形。

研究分析了调试过程中发现的一些现象，提出了解决方案，提高了电源的性能。

## 结 论

1. 根据实验现象分析, 镁合金微弧氧化过程可以分为阳极氧化、微弧放电、大弧放电三个阶段。微弧氧化膜层是由一系列离散的微区电弧放电产生的金属氧化物累积形成, 瞬间完成的微小区域内的电弧放电, 使生成的氧化物经历骤热骤冷过程, 从而可获得非平衡组织结构的金属氧化物膜层, 达到表面改性的目的。电弧本质上是气体在强电场作用下被电离、由绝缘体变为导体的过程中强烈负阻效应, 而产生剧烈光、热辐射的现象。产生微区电弧放电的必要条件是: 存在气体并承受强电场。

2. 实验发现在直流电压和单极性脉冲方式下具有很严重的大弧倾向, 而双极性脉冲和带放点回路的脉冲模式下大弧倾向不明显, 经比较发现带放电回路脉冲下的成膜速率、膜层形貌和耐腐蚀性均好于双极性脉冲模式下处理的微弧氧化膜层。

3. 由于脉冲宽度与放电回路时间的配比对于释放电解液系统的容性电具有较大的影响, 因此在确定频率的情况下改变占空比大小来研究膜层厚度和耐腐蚀性对于研究微弧氧化过程中工艺参数的配比具有较大作用, 正交实验发现在频率 700Hz、占空比 20%得到的膜层质量较优。

4. 设计以 80C196KB 单片机为核心的电源控制系统及以单片机 AT89C52 为核心的电源参数预置与显示控制系统, 二者通过串行通讯进行数据交互, 实现了友好的人机界面和高速可靠的控制系统。合理和高效使用了 80C196KB 单片机的各种口线, 尤其是高速口, 实现同步信号、故障保护信号的采集、IGBT 的驱动信号的产生。

5. 使用三相半控桥式整流电路作为电源整流电路, 既满足电源要求又节省了可控硅的个数, 提高了可控硅触发的可靠性。IGBT 并联结构实现了电源大功率输出, 降低设备的制造成本。并且主要使用均流电抗器对并联多 IGBT 进行过流保护和实现均流。

6. 微弧氧化过程可通过数字 PI 调节器进行控制, 电流和电压联合反馈调节电源的输出特性, 才能精确控制微弧氧化过程的电参数。数字 PI 算法可实现恒流、恒压两种电源外特性。对于恒压电源静特性, 通过电压反馈 PI 调节器进行恒压输出; 恒流静特性, 采用电流反馈的 PI 调节器确定恒流输出, 由此构成双 PI 调节器的微弧氧化电参数调节系统, 获得满意效果。

## 参考文献

- [1] 黄伯云. 我国有色金属材料现状与发展战略. 中国有色金属学报, 2004, 14
- [2] 吴振宁, 李培杰, 刘树勋等. 镁合金腐蚀问题研究现状. 铸造, 2001, 50 (10) :583-586
- [3] B L Mordike, T Ebert Magnesium. Properties-applications-potential. Materials Science and Engineering, 2001, (302):37-45
- [4] Gray J E, Luan B. Protective coatings on magnesium and its alloys-a critical review. Journal of Alloys and Compounds, 2002, (336):88-113
- [5] Yerokhin A L, Nie X, Leyland A. Plasma electrolysis for surface engineering. Surface and Coatings Technology, 1999, (122):73-93
- [6] Oscar K, Yahalom J. Constant Voltage Anodizing of Mg-Alalloys in KOH-Aluminate Solutions. Journal of Electrochem Soc, 1998, 145(1):190-193
- [7] 张文华, 胡正前, 马晋. 俄罗斯微弧氧化技术研究进展. 轻合金加工技术, 2004, 32(1): 25-29
- [8] Chigrinova S. R. Monison and T. Freund, J. Chem. Phys. 47.1543 (1967)
- [9] Chigrinova Rudnev V S, Vasil'eva MS, Lukiyanchuk IV. On the Surface Structure of Coatings Formed by Anodic Spark Method. Protection of Metal, 2004, 40(4):352-357
- [10] Nie, nTwite and Shimizu G P Wirtz, S.D. Brown and W.M. Kriven, Ceramic Coatings by Anodic Spark Deposition, Mater. & Manu, Proc, 6(1):87-115
- [11] Aicai, Yongqing and Shaffei Yuhuulon J. Proc. Shmp. Oxide-Electrolyte Interfaces (Edited by Aluitt R.S.). The Journal Electrochem. Inc, 1973
- [12] Gordienko and Rudnev Van T B et al. Am. Ceram. Soc. Bulletin, 1977, 56(6):563
- [13] Vlyssides Wirtz G P, Brown S D, Kriven W M. Ceramic coatings by anodic spark deposition. Materials and Manufacturing Processes, 1991, 6(1): 87-115
- [14] Nie Haruto Fukuda, Yasumichi Matsumoto. Formation of Ti-Si composite oxide films on Mg-Al-Zn alloy by electrophoretic deposition and anodization. Electrochimica Acta 50 (2005) :5329-5333
- [15] Faramarz Y Han, S H Hong, K W Xu, Porous nanocrystalline titania films by plasma electrolytic oxidation, Surface and Coatings Technology, 2002, 154,(2-3):314-318
- [16] 张英, 孟保平, 杨国英. 镁合金表面微弧氧化法. 轻合金加工技术, 2004, 32

(10):23-25

- [17] 胡宗纯,谢发勤,吴向清.不同控制方式下占空比对钛合金微弧氧化膜的影响.电镀与环保,2006,26(5):23-25
- [18] 段关文,李金富,王拥军,等.铝合金的微弧氧化研究.表面技术,2007,36(3):30-33
- [19] 李颂.镁合金微弧氧化膜的制备、表征及其性能研究.吉林大学,2007
- [20] 王立世,蔡启舟,魏伯康,等.国外镁合金微弧氧化研究状况.材料保护,2004,37(7):61-65
- [21] 蒋百灵,李均明.铝、镁合金微弧氧化技术的研究现状及应用前景.第八次全国热处理大会论文集,2003
- [22] 李瑛,余刚,刘跃龙,等.镁合金的表面处理及其发展趋势.表面技术,2003,(02)
- [23] 马跃洲,陈海涛,等.镁合金微弧氧化过程中局部烧蚀现象的研究,表面技术,2008,(1) 21-24
- [24] 梁春林,刘宜汉,韩变华,等.镁合金表面处理研究现状及发展趋势.表面技术,2006,(06)
- [25] 张勇,张虹,陈跃良,等.微弧氧化技术在航空领域的应用前景及存在的问题.材料保护,2008,41(9):43-45
- [26] 旷亚非,许岩,李国希.铝及其合金材料表面处理研究进展,电镀与精饰,2000(1):16-19
- [27] 张先锋,蒋百灵.能量参数对镁合金微弧氧化陶瓷层耐蚀性的影响,腐蚀科学与防护技术,2005,17(3):14-19
- [28] Changzhong Wang, Dong Zhang, Yongfeng Jiang. Growth process and wear resistance for ceramic coatings formed on Al-Cu-Mg alloy by micro-arc oxidation. Applied Surface Science (2006)
- [29] Fanya Jin, Paul K Chu, Guidong Xu, et al. Structure and mechanical properties of magnesium alloy treated by micro-arc discharge oxidation using direct current and high-frequency bipolar pulsing modes, Materials Science and Engineering A 435-436 (2006):123-126
- [30] 金凡亚,童洪辉.钛合金微弧氧化陶瓷膜微观特性的分析,材料保护,2005,38(8):30-31
- [31] 郝建民,陈宏,张荣军,等.镁合金微弧氧化陶瓷层的耐蚀性.中国有色金属学报,2003,13(4):988-991
- [32] 杨世彦,邓宇航,等.铝合金微弧氧化陶瓷膜过程中的特性研究.无机材料学报,2004,19(3):617-622
- [33] 蒋百灵,张先锋,朱静.铝合金镁合金微弧氧化陶瓷层的形成机理及性能.西

- 安理工大学学报, 2003, 19(4):17-21
- [34] 薛文彬, 邓志威, 来永春,等. 镁合金微等离子体氧化膜的特性. 材料科学与工艺, 1997, 5(2):89
- [35] 蒋百灵, 张淑芬, 吴建国,等. 镁合金微弧氧化陶瓷层显微缺陷与相组成及其耐蚀性, 中国有色金属学报, 2002, 12(3):454
- [36] Krysmann W, Kurze P, Dittrich K H. Process Characteristics and Parameters of Oxidation by Spark Discharge (ANOF). Cryst Res Technology, 1984, 19 (7): 973-979
- [37] Xue W B, Deng Z W, Lai Y C. Analysis of phase distribution for ceramic coatings formed by Microarc Oxidation on Aluminum alloy. J Am Ceram Soc, 1998, 81(5): 1365-1368.
- [38] 杨世彦. 微弧氧化电源及负载特性分析与匹配: 哈尔滨工业大学, 2005, 35-39
- [39] 龙北玉, 吴汉华, 王乃丹. 单片机控制的微弧氧化电源. 自动化技术与应用 2004, 23 (12):55
- [40] 冯欣荣, 吴汉华, 龙北玉. 多功能微弧氧化电源的研制. 仪表技术与传感器, 2004, 9
- [41] 叶振忠, 孙梅等. 晶闸管 CO<sub>2</sub> 焊机的新型同步及触发电路. 电焊机. 2003. 6
- [42] 陈克选, 祖立国, 李春旭,等. 微弧氧化电源 IGBT 驱动和保护研究. 电焊机, 2006, 36 (10) :40-44
- [43] 孙涵芳. Intel 16 位单片机[M].北京:北京航空航天大学出版社,1995
- [44] 丁坤, 邱华. 单片机系统在全位置自动焊接中的应用(抗干扰方面). 电焊机. 2002. 8
- [45] Rudnev V S, Vasil'eva M S, Lukiyanchuk I V. On the surface structure of coatings formed by anodic spark method. Protection of Metal, 2004, 40 (4) :352-357
- [46] 田健, 郭会军, 王华民等. 大功率 IGBT 瞬态保护研究. 电力电子技术, 2000,(4):29-30
- [47] Protiwa F F, Apeldoorn O, Groos N. New IGBT model for PSPICE. Power Electronics and Applications. France Fifth European Conference, 1993
- [48] 阎峰云, 范松岩, 强旭东等. AZ91D 镁合金微弧氧化工艺参数的研究. 特种铸造及有色合金, 2008 年年会专刊:240-243
- [49] 蒋莉, 樊芷芸. 等离子体及其应用. 惠州大学学报, 2000(4):53-60
- [50] 雷红. 等离子体技术及应用. 琼州大学学报, 2004(2):86-92
- [51] 蒋百灵, 张先锋, 朱静. 铝镁合金微弧氧化技术研究现状和产业化前景. 金属热处理, 2004(1):98-103
- [52] 朱爱国, 许雪艳, 朱仁义. 介质阻挡放电产生等离子体简介. 巢湖学院学报,

2008(6):56-62

- [53] 王振滨, 曹广益, 朱新坚. 基于状态空间模型分解的分数阶系统辨识算法. 系统工程与电子技术, 2004(12):38-45
- [54] 贺永胜, 赵志龙, 刘一洋. 铝合金微弧氧化热力学机理及影响因素的分析. . 电镀与环保, 2005(6):126-141
- [55] 王乃丹, 龙北玉, 吴汉华. 单极性脉冲电流密度对铝合金 MAO 膜相结构和微结构的影响. 吉林大学学报(理学版). 2005, 34(5):645-649
- [56] 王立世, 蔡启舟, 魏伯康. 镁合金双脉冲微弧氧化表面膜层的形成及结构分析. 特种铸造及有色合金, 2005, 25 (3) :187-190
- [57] 吕宪义, 金曾孙, 吴汉华. 阴/阳极电流密度对铝合金微弧氧化陶瓷膜特性的影响. 吉林大学学报(理学版), 2005, 43 (1) :64-67
- [58] 龙辉. 可控硅的特性检测和典型应用. 益阳职业技术学院学报, 2006 ,3,52-54
- [59] 钱金川, 朱守敏. 电力电子器件 IGBT 的应用与保护. 电焊机, 2008, 38 (3) :42-47
- [60] 金磐石, 王永明. Intel 96 系列单片微机应用详解. 北京: 电子工业出版社. 1992
- [61] 孙稚, 孙梅生, 王磊. 大功率 IGBT 驱动模块 2SD315A 的特性及其应用. 电力电子技术, 2002, 36 (6) :73-75

## 致 谢

本文是在恩师马跃洲教授的悉心指导和殷切关怀下完成的。马老师渊博的知识、严谨的治学态度、一丝不苟的学术风格、勤于思考、勇于创新的思维方式深深地感染了我，在未来的日子里将继续鞭策和激励我前进，使我受益终生。马老师不仅以自身渊博的学识指导着我的学习和科研，还通过言传身教告诉了我许许多多做人的道理，使我受到了良好的人格教育及文化熏陶，学术水平与道德修养得到了同步提高；在不乏浮躁的当今社会，让我懂得了要认清自己的方向，做好自己的本分，以脚踏实地、认真严谨的精神做学问，同时更要踏踏实实的做人，所有这一切对我今后的学习和工作必将产生深远的影响，这将是我最为宝贵的财富，在此表示最诚挚的感谢！

特别感谢我的父母，谢谢他们给予我的理解、关心与支持，使我顺利完成学业！

最后，再次感谢马老师对我各方面的关心与帮助，对我的所有批评，让我认识到自己的不足，顺利完成论文！

## 附录 A 攻读学位期间所发表的学术论文目录

- [1] 李泽, 马跃洲, 陈明, 王巧霞. 过电压对镁合金微弧氧化膜层性能的影响. 热加工工艺, 已接受, 待发表, 文章编号 09-0556.
- [2] 王巧霞, 马跃洲, 姜均涛, 李泽. 脉冲宽度对镁合金微弧氧化成膜的影响. 材料保护, 2009, 42(3): 41~43
- [3] 姜均涛, 马跃洲, 李泽, 王巧霞. 镁合金微弧氧化过程中熄弧方式对膜层性能的影响. 新技术新工艺, 2009, 3: 118~120